

TEM 정밀 시편 제작용 몰리브덴 합금 미세 고정 부품의 제작을 위한 절삭 가공 방법에 관한 연구

김기범¹ · 이창우¹ · 이해진¹ · 함민지¹ · 김건희[†]

한국생산기술연구원 적층성형가공그룹^{1,†}

A study on machining method about molybdenum alloy micro fixing part for TEM precision specimen.

Ki-Beom Kim¹ · Chang-Woo Lee¹ · Hae-Jin Lee¹ · Min-Ji Ham · Gun-Hee Kim[†]

Additive Manufacturing Process R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology[†]

(Received October 17, 2017 / Revised November 16, 2017 / Accepted November 24, 2017)

Abstract: In these days, increase requirement of TEM (Transmission Electro Microscope) in not only scientific field but also industrial field. Because TEM can measure inner-structure of specimen a variety of materials like metal, bio. etc. When use TEM, specimen should be thin about 50nm. So making for thin specimen, use Ion milling device that include specimen holder. The holder generally made of Aluminium. Aluminium holder is worn away easily. For this reason, using time of ion milling with aluminum holder is too short. To solve the problem, we replace aluminium holder to molybdenum alloy holder. In this paper, we design molybdenum alloy holder for CAM and modify CAD modeling for effective machining process. So we array a specimen 3 by 4 and setup orientation for one-shot machining process. Next we make a CAM program for machining. we making a decision two machining strategy that chose condition of tool-path method, step-down, step-over, etc. And then conduct machining using CNC milling machining center. To make clear difference between case.1 and case.2, we fixed machining conditions like feed-rate, main spindle rpm, etc. After machining, we confirm the condition of workpiece and analysis the problems case by case. Finally, case.2 work piece that superior than case.1 cutting with WEDM because that method can not ant mechanical effect on workpiece.

Key Words: CAD, CAM, CNC, Machining, Molybdenum alloy, TEM, WEDM

1. 서 론

투과전자현미경(TEM, Transmission Electro Microscope)은 금속, 세라믹, 반도체, 고분자합성체 등의 재료분야 및 의학, 생물학 등의 생체시료 조직관찰에 사용되는 측정 장비로 단순 표면만 관찰하는 수준을 넘어서 내부 조직을 관찰할 수 있다는 장점 때문에 과학계 전반에 걸쳐서 널리 사용되고 있다. 투과전자현미경은 필라멘트에서 방출되는 전자선이 시료를 투과하여 이미지를 형성하다. 전자선이 시료를 투과하기 위하여 일반적으로 시료는 인체 모발 두께의

1/2,000에 해당하는 50~60nm 수준으로 얇게 절단하여야 한다^{1,3-6)}.

투과전자현미경의 경우 측정 가능한 시편 제작을 위하여 이온 밀링을 사용하게 된다. 이 과정에서 시료 고정을 위한 이온 밀링 홀더가 사용된다. 기존 이온 밀링 홀더의 경우 알루미늄으로 제작하였으며 이로 인하여 상대적으로 마모가 심하여 교체 주기가 짧아 장비 활용 효율을 저하 시키는 문제가 있었다⁷⁻⁹⁾. 본 논문에서는 이러한 단점을 보완하기 위하여 기존 알루미늄으로 제작되었던 이온 밀링 홀더를 상대적으로 내마모성이 높은 몰리브덴 합금으로 대체하여 장비 활용 효율 높이는 것을 목적으로 제작하였다. 이를 위하여 가공하고자 하는 몰리브덴 합금의 물성 분석을 수행하였으며, 이를 토대로 사용 가능한 공구를 선정하였다. 이후 홀더의 3차원

1. 한국생산기술연구원 적층성형가공그룹

† 교신저자 : 한국생산기술연구원 적층성형가공그룹
E-mail: venkey@kitech.re.kr

모델링 및 효과적인 가공 계획을 선택하였으며, 이에 따라 CAM 가공 프로그램 작성 및 CNC milling machining center를 이용한 가공을 진행하였다. 최종적으로 보다 우수한 가공 결과에 대하여 WEDM을 이용하여 cutting을 진행하였다.

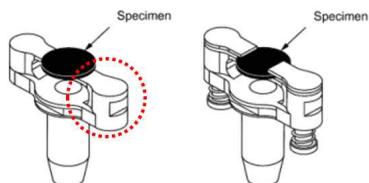


Fig. 1 Ion milling holder

2. 피가공물 기계적 물성 분석

이온 밀링 홀더 가공을 위하여 공구 선정 및 가공 조건 결정을 위한 몰리브덴 합금의 기계적 물성치인 경도와 조성을 확인하였다.

2.1. 피가공물 Vickers 경도 분석

가공하고자 하는 공작물의 정확한 기계적 물성을 파악하기 위하여 경도 측정을 실시하였다. 경도 측정이 가능한 크기로 시편을 절단하기 위하여 시편 절단기를 이용하였으며 경도 측정 표면을 연마하기 위하여 연마기를 이용하여 측정하고 하는 표면을 연마하였다. 연마된 표면에 대하여 Mitutoyo사의 HM-200 장비를 이용하여 경도를 측정하였다. 측정 방법은 임의의 지점 12곳에서 측정을 통하여 얻어진 결과 값의 평균으로 경도 값을 얻었다. 그 결과 몰리브덴 합금의 Vickers 경도 값은 242HV로 측정되었다.



Fig. 2 Automatic micro hardness tester

2.2. EDS를 이용한 피가공물 조성 분석

EDS(Energy Dispersive Spectrometer)는 고 에너지의 전자빔을 시편에 조사하여 각 원자의 전자가 들뜬 상태에서 안정한 상태로 떨어지는 과정에서 발생하는 다양한 Signal을 분석하여 대상물에 포함되어 있는 원자의 종류 및 조성을 확인할 수 있는 측정 방법이다²⁾. 본 연구에서는 가공에 사용될 몰리브덴 합금의 조성을 확인하기 위하여 Ametek사의 EDAX TSL 장비를 이용하여 조성 측정을 진행하였다. 본 장비의 경우 단독으로 사용되는 것이 아닌 FEI사의 Quanta FEG 250 장비에 부가적으로 장착되어 물성측정에 필요한 데이터를 추출을 통한 측정 대상의 조성을 확인하였다.



Fig. 3 Energy dispersive spectrometer

Table 1 Quanta FEG 250 specifications

SEM	1 kV	3.0 nm without BD
	30 kV	1.0 nm
	3 kV (low vacuum)	3.0 nm
	Max beam current	200 nA
Vacuum	Modes	High Vacuum
		Low Vacuum (up to 200 Pa)
		ESEM (2600 Pa)

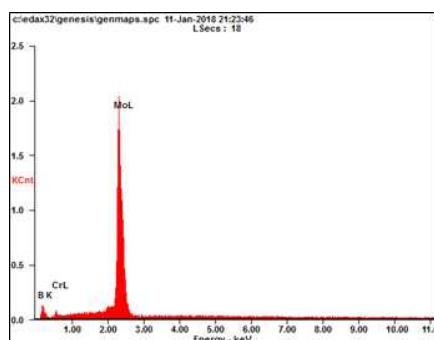


Fig. 4 Result of EDS

EDS 측정결과 Fig. 4 와 같이 3가지 원소에 peak 가 측정되었으며 정량적 측정값은 Table. 1에 나타나 있다. 측정을 통하여 본 연구에서 가공할 몰리브덴 합금은 Mo-Cr-B 합금임을 확인할 수 있었다.

Table 2 Material properties of Molybdenum alloy

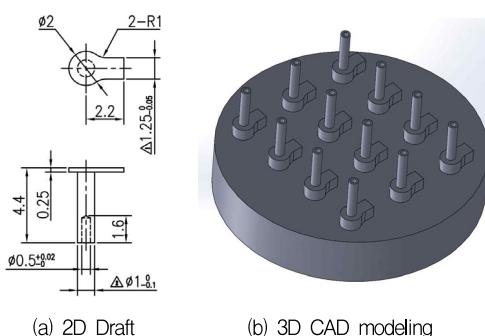
Element	Wt%	At%
BK	11.96	50.24
CrL	20.24	17.67
MoL	67.80	32.09

3. 실험방법 및 결과

본 연구에서는 가공의 정밀도와 가공효율을 높이 기 위하여 CAM 프로그램을 이용하여 가공프로그램을 작성하였으며 이를 위하여 전 과정으로 CAD 작업을 수행하였다.

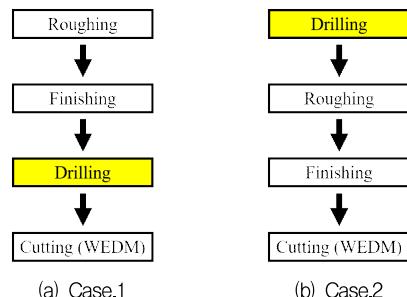
3.1. 가공 모델 생성

기준에 가공하고자 하는 부품에 대한 2차원 도면을 토대로 CAM 작업을 수행하기 위하여 3차원 모델 설계를 위한 CAD 작업을 수행하였다. 이 과정에서 공작물의 크기 및 가공효율을 고려하여 하나의 공작물에 3x4 배열로 총 12개의 제품을 위치하여 1회 가공에서 12개의 제품이 동시에 제작 가능한 3차원 모델링을 수행하였다. 또한 공작물을 한 번의 고정 작업으로 전체 형상이 가공 될 수 있는 Orientation으로 제품을 배치하여 공작물 고정에서 발생하는 가공시간 증가, 정밀도 저하 등의 문제를 사전에 방지하였다.

**Fig. 5** CAD modeling

3.2. 절삭 공정 계획 수립

몰리브덴 합금 미세 부품 제작을 위하여 Fig. 6과 같이 가공 프로그램 계획을 2가지로 하여 본 연구를 수행하였다. Case.1의 경우 일반적인 가공 프로그램 작성 계획인 황삭, 정삭, 드릴링, 커팅 순서로 작성하였으며 Case.2의 경우 제품의 높은 세장비, 상대적으로 긴 기둥구조를 고려하여 드릴링, 황삭, 정삭, 커팅 순서로 가공프로그램을 작성하였다.

**Fig. 6** Machining strategy**Table 3** Machining conditions

Condition	Roughing	Finishing
Method	Raster	Optimize Contour
Tolerance [mm]	0.05	0.001
Allowance [mm]	0.1	0.0
Step-over [mm]	0.5	0.5
Step-down [mm]	0.5	X

CAM 프로그램 작성은 위하여 Fig. 7과 같이 앞서 설계한 CAD modeling에 가공하기 전의 공작물을 고려만 Block을 설정하였다.

각 공정에서의 상세 가공조건은 황삭의 경우 툴패스 방법은 라스터 조건으로 설정하였으며 가공방향은 하향, 공차는 0.05, 가공여유는 0.1, 스텝오버는 0.5, 스텝다운은 0.5로 하여 가공 툴패스를 작성하였다. 정삭의 경우 툴패스 방법은 옵티마이즈 등고선 조건으로 설정하였으며 공차는 0.001, 가공여유는 0.0, 스텝오버는 0.5로 하여 툴패스를 작성하였다. 마지막으로 드릴링의 경우 홀 깊이를 고려하여 1회 가공량을 0.4로 하고 1회 가공 후 초기점으로 복귀하여 가공 열 냉각 및 칩 배출이 용이하도록 툴패스를 작성하였다.

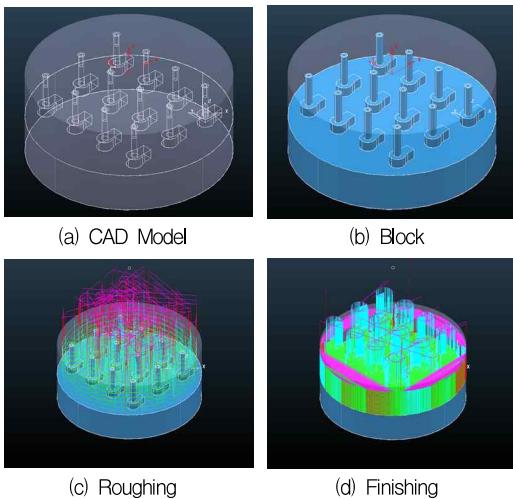


Fig. 7 CAM program

3.3 CNC 밀링 공정

몰리브덴 합금의 가공을 위하여 앞서 측정하였던 경도 값을 토대로 3가지 공구를 선정하였다. 가공 조건은 동일하게 하여 시험 가공을 진행하였다. 시험 가공은 제품형상이 1개만 있는 모델을 가공하는 시험가공 후 결과 확인 후 12개 형상이 배치되어 있는 모델을 본 가공하였다.

가공 결과 Fig. 8에서 보이듯이 HSS의 경우 시험 가공에서 공구마모가 극심하게 발생하여 CUPS과 burr가 많이 발생하여 제외되었으며 WC-UT의 경우 본 가공에서는 양호한 결과를 보였으나 2차 가공에서 극심한 공구 마모 및 파손에 의하여 비정상 가공이 발생하여 제외 되었다. 이에 따라 최종적으로 다이아몬드 코팅이 된 WC-Diamond 공구를 선정하였다.

Table 5 Tooling list for machining

Material	Coating	Hardness(HV)
HSS	None-coating	740
WC	Coating	3,500
WC	Diamond	9,000

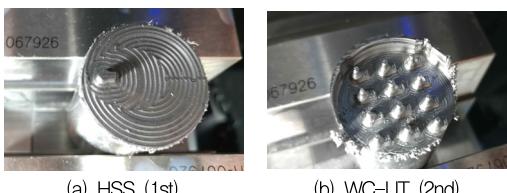


Fig. 8 Result of test machining

몰리브덴 합금 미세 부품을 가공하기 위하여 작성한 툴패스를 이용하여 앞서 결정한 계획에 따라 2 가지 경우로 가공을 진행하였다. 가공에 사용된 CNC milling machining center는 DMG MORI사의 Ultrasonic 20 Linear이며 가공 조건은 황삭, 정삭 모두 동일한 주출 스팬들 회전속도: 10,000rpm, 가공 이송속도: 100mm/min, 절삭유 사용으로 하여 가공을 진행하였다.



Fig. 9 CNC milling machining center

Table 6 Specification of CNC milling machining center

Item	Value
Max. table load	15 kg
Table diameter	250 mm
Max. workpiece height	180 mm
Standard speed	42,000 rpm
Torque (100% DC)	6 Nm
Frequency	15-55 kHz

가공 결과 드릴링, 황삭, 정삭 순서로 가공한 Case.1의 경우 Fig. 10과 같이 부품의 기둥 형상 자체가 부러지거나 미세 흄 가공에서 기둥의 벽면 부분이 파단 된 경우가 나타났다. 이는 황삭, 정삭 과정에서는 관찰되지 않았던 문제로 드릴링 공정에서 문제가 발생한 것으로 판단된다.

몰리브덴 합금 미세 부품은 기둥형상이 직경 1mm, 높이 4.15mm로 되어 있으며, 기둥구조 중심에 깊이 1.6mm, 직경 0.5mm의 미세 훌이 있다. 이러한 구조에서 Case.1의 가공 계획의 경우 황삭, 정삭 이후 드릴링을 진행하는 과정에서 가공 중에 남는 살 두께가 0.25mm 수준으로 매우 얇아서 기둥 벽이 가공 중에 파단 되었다. 또한 드릴링 시작 시 기둥 상단부에 드릴이 접촉하는 경우 기둥 하단부에 작용하는 모멘트 값이 극대화되어 기둥 구조 자체가 부러지는 현상이 발생하였다. 이는 사용된 몰리브덴 합금이 상대적으로 취성이 높은 재료여서 이러한 현상이 더 극대화 된 것으로 판단된다.



Fig. 10 Result of Case.1

Case.2의 경우 Fig. 11에서 보이듯이 앞서 Case.1에서 발생하였던 문제들이 나타나지 않았으며 이는 선택한 드릴링, 황삭, 정삭 가공 계획에 효과로 볼 수 있다. Case.2는 원통 형태의 몰리브덴 합금에서 드릴링 공정이 진행 시작되어 있어 얇은 벽면에 의하여 발생하는 파단, 높은 모멘트에 의하여 발생하는 기둥의 부러짐 등이 발생하지 않았다. 이후 황삭, 정삭 공정의 경우 앞선 Case.1과 동일하게 수행하여 설계된 형상과 치수를 갖는 공작물을 제작하였다.



Fig. 11 Result of case.2

3.4 WEDM Cutting 공정

제작된 몰리브덴 합금 미세 부품을 사용할 수 있는 상태로 분리하기 위하여 Cutting 공정을 수행하

였다. 앞선 기계가공에서 발생하였던 몰리브덴 합금의 깨짐, 부러짐 현상을 참고하여 Cutting 공정은 이 반직인 기계 가공이 아닌 특수가공 중 하나인 와이어 방전가공을 이용하였다. 방전가공은 와이어에 음극, 공작물 양극을 인가 한 후 접촉이 없는 상태에서 고접압을 인가하여 전자가 방출되는 에너지를 이용하여 형상을 가공하는 방식이며 가공물에 기계적 영향이 없다는 특징을 가지고 있다.



Fig. 12 WEDM

본 연구에서 사용한 WEDM 장비는 Mitsubishi사의 FA10S 장비로 사용된 와이어의 직경 250um와 방전가공 옵셋량 200um을 고려하여 Fig. 13과 같이 Cutting 공정을 통하여 치수에 맞는 최종 제품을 제작하였다.



Fig. 13 Part of molybdenum alloy

Table 7 Dimension of specimen

Item	Design	Measure	Error[%]
Height[mm]	4.15	4.20	1.20
Diameter[mm]	1	1.03	3.0
Length[mm]	1.25	1.21	3.2

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 동일한 재료, 가공 조건에서 가공 방법에 따른 제품 정밀도 및 결합에 관한 영향을 확인하였다. Fig. 13에서 보이듯이 Case.1의 경우 드릴링 작업을 황삭, 정삭 이후에 진행함에 따라 육안으로 보일 정도로 기둥 구조의 휘어짐, 부러짐 현상이 발생하는 것을 볼 수 있었으며 다른 기둥 구조에서도 적절한 드릴링 공정이 이뤄지지 않음을 확인할 수 있었다. 이는 정삭 후 얇아진 기둥구조가 드릴링 공정에서의 하중에 의하여 높은 모멘트가 발생하여 부러지는 현상과 얇은 기둥 벽면에서 몰리브덴 합금의 Brittleness에 의하여 파손된 것으로 판단된다.

Case.2의 경우는 이러한 문제가 발생하지 않았으며 이는 Bulk한 형태의 공작물에 드릴링 공정을 수행하여 Case.1에서 기둥구조에 따른 높은 모멘트, 얇은 벽이 아닌 상태여서 정상적인 가공이 가능한 것으로 판단된다.

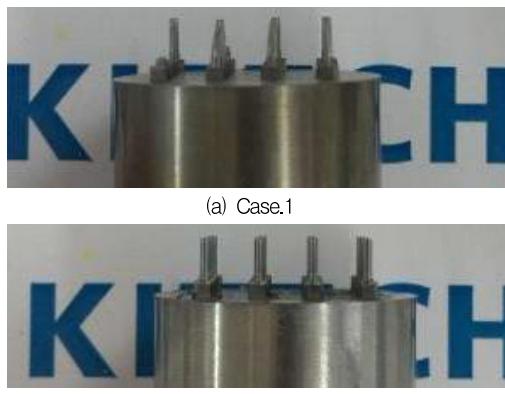


Fig. 13 CNC Milling Machining Center

본 연구를 토대로 공작물의 물성 및 제품에 형상에 따라 일반적인 가공 계획이 아닌 상황에 맞는 가공 계획 선택의 중요성을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 황삭, 정삭, 드릴링 공정은 모두 동일한 가공 조건을 사용하였으나 이는 본 가공을 위한 최적의 가공 조건이라고 보기에는 어려움이 있다. 따라서 추가적으로 각 공정에서 가공조건에 따른 가공품질 변화에 관한 연구뿐만 아니라 공구 동력계 등과 같은 센서를 이용하여 가공 중에 발생하는 절삭력의 변화 등의 데이터 수집 및 분석을 통

한 최적 가공 조건 도출에 관한 연구가 이루어져야 할 것이다.

후기

본 연구는 기획재정부의 수요기반 생산현장 기술 애로 지원사업의 일환으로 수행하였음. [JC180009, 복합기능구현 적층성형기술개발 및 기업지원사업]

참고문헌

- 1) A. Loynuk, D. Poppitz, U. Ross, J. W. Gerlach, F. Frost, S. Bemütz, E. Thelander, B. Rauschenbach, “Focused high- and low-energy ion milling for TEM specimen preparation”, *Microelectronics Reliability*, Vol. 55, Issues9-10, pp. 2119-2125, 2015.
- 2) J. Li, T. Mails, S. Dionne, “Recent advances in FIB - TEM specimen preparation techniques”, *Materials Characterization*, Vol. 57, Issue 1, pp. 64-70, 2006.
- 3) Yu. B. Kuz'ma, “An X-Ray structural investigation of the systems niobium-titanium-boron and niobium-molybdenum-boron” *Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics* Vol.10 Issue 4, pp. 298-300, 1971.
- 4) R. Steinitz, I. Binder, D. Moskowitz, “System Molybdenum-Boron and Some Properties of The Molybdenum-Borides”, *JOM*, Vol 4, Issue 9, pp. 983-987, 1952.
- 5) F. Morito, N. I. Danylenko, H. Saito, A. V. Krajnikov, “Boron Distribution and Microstructure in Molybdenum-Boron Alloys” *Metallic Materials with High Structural Efficiency*, Vol 146, pp. 347-354, 2004.
- 6) C. A. Spindt, I. Brodie, L. Humphrey, and E. R. Westerberg, “Physical properties of thin film field emission cathodes with molybdenum cones” *Journal of Applied Physics*, Vol 47, Issue 12, pp. 5248, 1976.
- 7) 최규완, 장성호, “사각뿔/원뿔 형상의 마이크로 니들 가공 기술 개발”, *한국금형공학회지* 제10권 제3호, 25-29, 2016.
- 8) 문영대, “DMLS와 NC복합가공기의 실용성 검토”, *한국금형공학회지* 제9권 제3호, 34-40, 2016.
- 9) 배성환, 민경호, “기계적 특성 향상을 위한 미그네슘 합금의 등통로각압출 공정 조건에 관한 연구”, *한국금형공학회지* 제10권 제1호, 12-18, 2016.