

초정밀 선반을 사용한 알루미늄 7075와 실리콘의 초정밀가공 특성연구

김우강[#], 김건희*, 원종호**

A Study on the Precision Machining Characteristics of Aluminium 7075 and Silicon using Ultra-precision Turning Machine

Woo-Kang Kim[#], Kun-Hee Kim*, Jong-Ho Won**

ABSTRACT

This study aims to find the optimal cutting conditions, when are nonferrous metals(aluminum and silicon) are machined with diamond tool of diamond turning machine. Diamond turning machine has been widely used in manufacturing optical reflectors of nonferrous metals. Such as aluminium and copper are easy to be machined because of their proper ductility. But optical crystals being discussed here are characterized by their high brittleness which makes it difficult to obtain high quality optical surfaces on them. The purpose of this study is to find the optimum machining conditions for ductile cutting of silicon and aluminium

Key Words : Nonferrous metal(비철금속), Optimum machining condition(최적가공조건), Ductility(전성), Optical surface(광학표면)

1. 서 론

초정밀 절삭의 기본 원리는 매우 정도가 높은 공작 기계의 운동을 날카로운 공구를 이용하여 공작물에 전달하는 것을 말한다. 최근 항공 우주산업, 반도체, 컴퓨터, 영상정보산업, 정밀기계산업 등의 발달로 인해 정밀기계부품의 가공은 고 부가가치 기술로서 매우 중요하게 인식되고 있으며, 특히 이러한 제품을 생산하기 위해서 초정밀 가공에 대한 연구가 활발히

진행되고 있다.

또한 현대 산업사회는 고정도 가공에 대한 필요성이 확대되고 있다. 산업이 고도화됨에 따라 그 중요성이 더욱 강조되고 있는 초정밀 가공기술은 제품의 고 부가가치 창출은 물론 산업 전반에 가공기술의 파급 효과를 미치고 있다.^{1),2),3),4)}

국내에서는 연구소를 중심으로 초정밀의 연구가 일부 이루어지고 있으나 아직 선진국에 비하여 극히 미약한 수준에 머무르고 있는 실정이다. 한편 초정밀 가공 부품의 재료로서는 전자 산업과 정보 산업의 발달로 인하여 고정밀도가 필요하게 된 알루미늄, 구리, 무전해 니켈 등의 금속 및 플라스틱, 실리콘, 게르마늄 등의 비금속 등이 사용되고 있으며 이런 재료들은 연삭 가공으로는 높은 정도를 내기가 어렵다.

교신저자 : 충남대학교 대학원 기계공학과

E-mail : wkim@kdac.co.kr

* 한국기초과학지원연구원 초정밀가공팀

** 충남대학교 기계공학과

이와 같은 단점들을 해소하기 위해 최근에는 고정도·고강성을 지닌 초정밀 가공기와 내마모성이 큰 천연 다이아몬드공구를 이용한 초정밀 절삭 가공기술이 급속히 발전하고 있다.^[5,6,7]

최근 연철 금속과 광학 유리등의 초정밀 절삭가공의 수요가 급증하고 있으며, 이에 대한 기초기술, 응용기술 및 가공 시스템 개발에 관한 연구가 활발하다.^[8,9,10] 따라서, 본 연구에서는 근간에 관심의 대상이 되고 있는 비철금속의 절삭가공에 주안점을 두어, 단결정 다이아몬드공구를 이용한 비철금속인 알루미늄 7075와 단결정 실리콘에 대한 최적의 가공조건을 찾는 것이며, 취성 재료의 초정밀 광학요소들을 제조하는데 다이아몬드 선삭기술을 적용하는 것이다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험재료

피삭재는 알루미늄 7075와 단결정 실리콘을 사용하였으며, Table 1은 Al7075의 재료의 성분분석 결과이다.

Table 1 Chemical composition of specimen (wt%)

	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Al
Al7075	0.10	0.08	0.03	4.11	0.43	0.02	0.01	0.08	Rest

본 실험에서 사용된 천연다이몬드 바이트의 형상은 Fig. 1과 같다. 실험에 사용된 공구재료는 천연다이아몬드 바이트이며, 공구의 기하학적 형상 및 크기는 윗

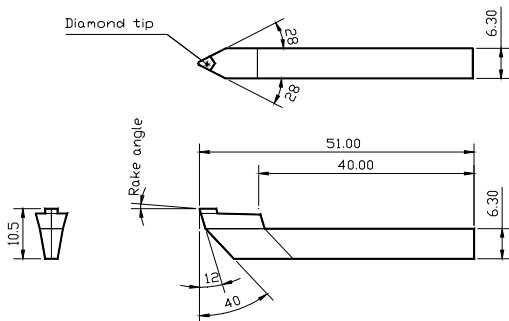


Fig. 1 Shape of diamond tool

면 경사각 0°, -5°, -25°, 여유각 12°와 선단반경은 1 mm, 0.8mm로서 국내 다이아몬드공구 제작사에 의뢰하여 제작하였다

Fig. 2는 시편으로 사용된 피삭재의 형상을 나타낸다. 초정밀 가공 시험 대상면은 $\phi 38\text{mm}$ 부분의 끝단으로 단면 절삭 실험을 하였으며, 거칠기 측정은 Fig. 2에서 보여주듯이 $\phi 30\text{mm}$ 부분에서 측정하였다.

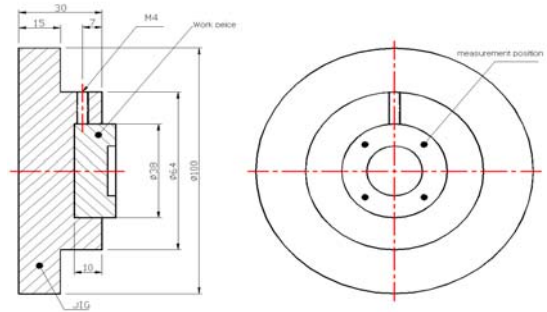


Fig. 2 Shape and dimensions of the workpiece used in experiment

2.2 절삭력 측정 장치

초정밀 절삭가공시의 절삭력을 측정하기 위해 Fig. 3과 같은 절삭력 측정장치를 구성하였다. 본 실험에서는 초정밀 가공 시 발생하는 미세 절삭력을 측정하기 위해, z-축 강성이 1000N/ μm 인 KISTLER사의 9251A센서를 내장한 공구홀더를 설계·제작했다. 9251A를 통해 얻은 절삭력 신호는 KISTLER사의 다채널 증폭기 (multichannel charge amplifier) Type 5011를 통해 신호를 증폭하였다. 입출력 보드(analog & digital I/O board)는 Measurement Computing Co. 의 CIO-DAS1600/12를 사용하였으며, 절삭력 신호는 컴퓨터 응용 소프트웨어인 Dyno Wave® V1.11을 사용하였다.

본 논문에서는 단면절삭 시 절삭력을 측정하였으며, Fig. 3과 같이 공작물의 가공면과 평행한 Y축 방향의 힘을 주절삭력 F_t (Tangential force), 공작물과 수직인 Z축 방향을 배분력 F_n (Normal force), 이송방향인 X축 힘을 이송분력 F_f (Feed force)로 표기하였다. 또한, 로우 패스 필터(Low pass filter)는 100Hz를 사용하였으며, 시간상수(Time constant)는 long을 사용하여 측정하였다.

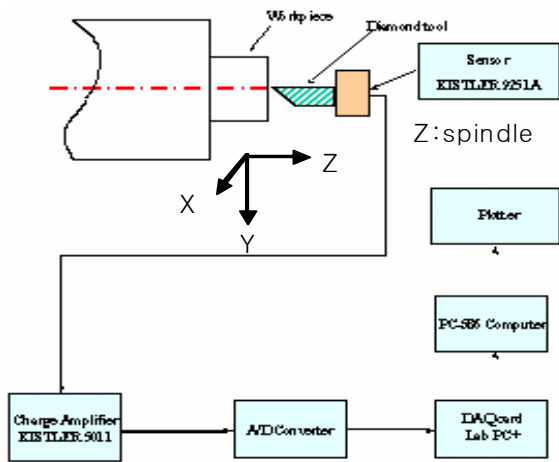


Fig. 3 Diagram of set up for force measurement system

3. 실험결과 및 고찰

본 연구는 절삭속도, 절삭깊이, 이송속도, 공구경사각을 주요 변수로 하였으며, 절삭력과 표면 거칠기 측정하여 초정밀 절삭 특성을 고찰함으로써 연성재료인 알루미늄 7075뿐만 아니라 취성재료인 단결정 실리콘의 신뢰성 있는 절삭력 데이터와 표면 거칠기 얻음으로써 최적의 절삭조건을 찾아내기 위한 것이다.

3.1 이송속도 변화에 따른 절삭력

Fig. 4와 Fig. 5은 각각 단결정 실리콘과 알루미늄 7075의 주축속도 140m/min, 절삭깊이 10 μ m의 조건에서 이송속도 변화에 따른 절삭력을 측정한 결과이다. 단결정 실리콘에 비해 알루미늄 7075의 절삭력이 크게 나타났다. 그 이유는 단결정 실리콘의 경우 취성이 강해 칩이 잘게 부서져 공구에 간섭을 일으키지 않으나, 알루미늄의 경우 유동형 칩이 가공면과 공구사이에 밀려들어가 정상절삭이 이루어지지 않기 때문에 단결정 실리콘의 절삭력이 알루미늄 7075에 비해 작게 측정된 것으로 판단된다. 단결정 실리콘의 경우 10 mm/min이하의 이송속도에서는 배분력이 주분력에 비해 작게 나타나지만, 20mm/min이상의 이송속도에서는 주분력이 크게 나타남을 볼 수 있다. 그 이유는 배분

력은 경사각의 마찰력이 대부분을 차지함으로 이송속도가 느릴 경우 마찰력의 영향으로 주분력이 배분력보다 작게 나타나지만, 이송속도가 빨라질수록 절삭면적이 증가하므로 주분력이 증가하는 경향을 보인다. 이송속도에 대한 절삭력의 경향을 보면, 이송속도가 증가할수록 절삭력이 크게 나타나는데 이는 이송속도가 절삭면적이 증가하기 때문이다. 주분력은 거의 변화가 없으며, 배분력은 이송속도가 증가할수록 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다.

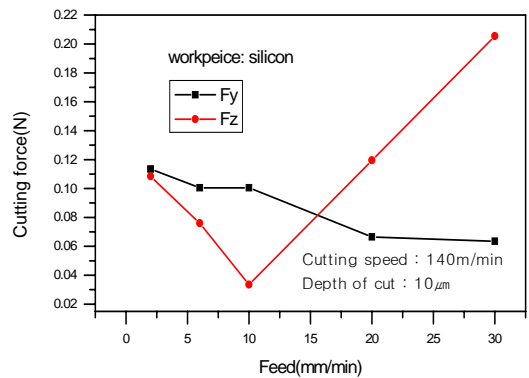


Fig. 4 Cutting force versus feed

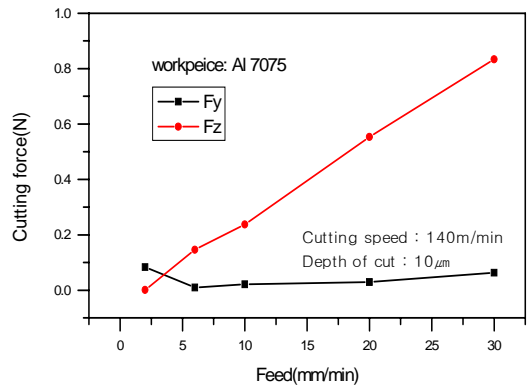


Fig. 5 Cutting force versus feed

3.2 절삭깊이 변화에 따른 절삭력

Fig. 6와 Fig. 7는 각각 단결정 실리콘과 알루미늄 7075를 주축속도 140m/min, 이송속도 10mm/min의 절삭조건 하에서 절삭깊이 변화에 따른 절삭력을 측정

한 결과이다. 단결정 실리콘과 알루미늄 7075의 절삭력 경향은 비슷하게 나타났으며, 두 재료의 주분력은 거의 변화가 없다. 배분력은 단결정 실리콘의 경우 5 μm , 알루미늄 7075는 10 μm 까지는 절삭력의 변화가 거의 나타나지 않는다. 이것은 5 μm 이하의 절삭깊이에서는 절삭 단면적이 작아 마찰력이 절삭력의 대부분을 차지하므로 변화가 거의 나타나지 않지만, 절삭깊이 5 μm 이상에서는 절삭깊이의 증가에 따라 절삭면적이 증가해 절삭면적에 비례해서 절삭력이 증가하게 되는 것으로 판단된다. 또한 -25° 를 가지는 음의 경사각을 가진 다이아몬드 공구를 가지고 절삭하였으므로 이 경우의 칩 배출 과정은 주로 러빙이나 버니싱 같은 소성변형에 의해 원활한 절삭이 이루어지지 않으므로, 5 μm 이상의 속도에서 주분력보다 배분력이 크게 나타난다고 사료된다. 절삭깊이 5 μm 에서 단결정 실리콘의 주분력은 0.067N, 배분력은 0.048N이고, 알루미늄 7075의 경우 주분력이 0.048N, 배분력이 0.059N으로 측정되었다.

따라서, 단결정 실리콘과 알루미늄 7075는 절삭깊이 0~5 μm 사이에서 안정된 절삭이 이루어지며 이 절삭깊이 이하로 절삭을 행하는 것이 유리하다. 하지만, 공구 절인 반경보다 작은 깊이의 절삭깊이에서 가공을 행할 경우, 절삭이 이루어지지 않고 소성변형이 이루어지며 플로잉 힘과 기계자체진동 및 외부 환경의 영향으로 정상절삭이 이루어지지 않는다. 따라서 절삭깊이가 1 μm 이상으로 하는 것이 바람직하다.

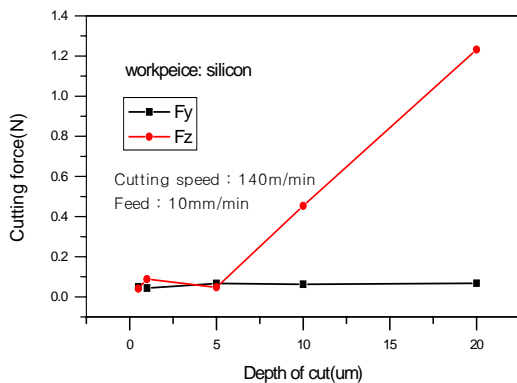


Fig. 6 Cutting force versus depth of cut

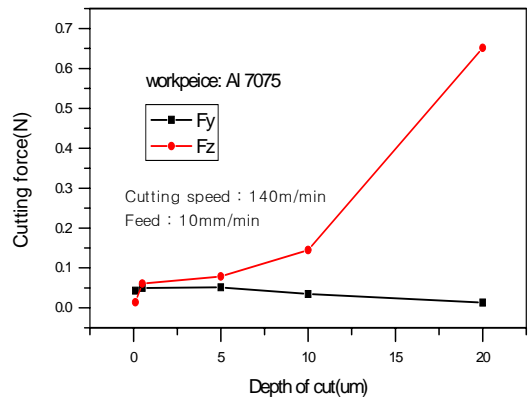


Fig. 7 Cutting force versus depth of cut

3.3 주축회전수 변화에 따른 절삭력

Fig. 8과 Fig. 9은 단결정 실리콘과 알루미늄 7075를 이송속도 5 mm/min , 절삭깊이 5 μm 이하로 고정하고, 주축회전수 변화에 따른 절삭력을 측정한 결과이다. 주축회전수가 증가함에 따라 단결정 실리콘과 알루미늄 7075는 모두 주분력과 배분력이 감소하는 경향을 보인다. 그 이유는 절삭속도가 증가하면 절삭온도가 상승하므로 공작물의 강도가 떨어져 절삭력이 감소하는 것으로 판단된다.

단결정 실리콘의 경우 120 m/min ~160 m/min 의 주축속도에서 안정된 절삭력을 보이고, 알루미늄 7075의 경우 140 m/min 이상의 절삭속도에서 일정한 절삭력이 측정되었다. 따라서, 이 구간에서 정상적인 절삭이 이루어지는 것으로 판단된다. 단결정 실리콘의 경우 주축속도

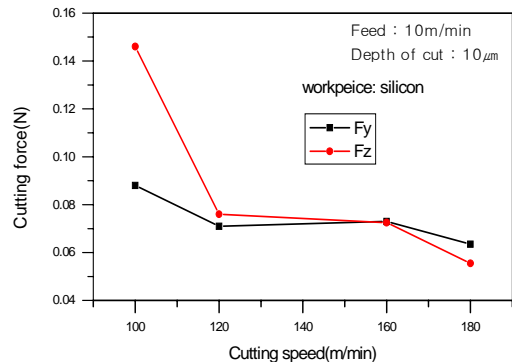


Fig. 8 Cutting force versus cutting speed

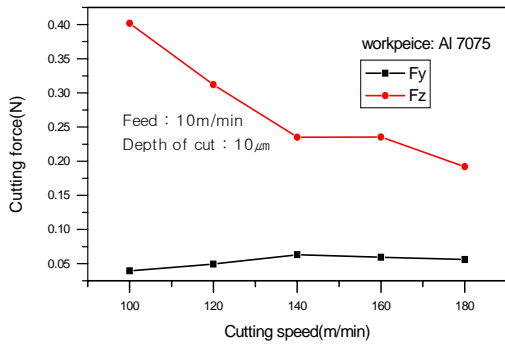


Fig. 9 Cutting force versus cutting speed

160m/min에서 주분력은 0.073N, 배분력은 0.0725N으로 측정되었으며, 알루미늄 7075의 경우 140m/min에서 주분력은 0.065N, 배분력은 0.2N으로 측정되었다.

3.4 절삭깊이 변화에 따른 표면 거칠기

Fig. 10는 단결정 실리콘과 알루미늄 7075의 주축속도 140m/min, 이송속도 10mm/min에서 절삭깊이 변화에 따른 표면 거칠기를 측정한 결과이다. 절삭가공에서 이론적 표면 거칠기 값은 절삭깊이에 영향을 받지 않는다. 그러나 본 실험에서의 측정결과를 볼 때 동일한 이송속도에서 절삭깊이의 증가에 따라 비례적으로 표면 거칠기가 증가하고 있다. 또한, 일정한 주축속도와 이송속도에서 알루미늄이 단결정 실리콘에 비해 표면 거칠기가 양호하게 나타남을 알 수 있다. 단결정

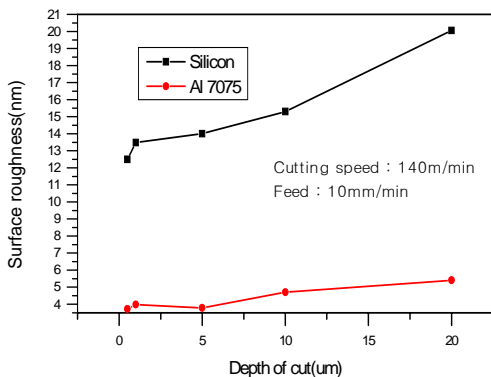


Fig. 10 Surface roughness versus depth of cut

실리콘과 알루미늄 7075는 5 μ m이하의 절삭깊이에서 모두 양호한 표면 거칠기 얻을 수 있다. 절삭깊이 5 μ m에서 단결정 실리콘은 17.38nm, 알루미늄 7075는 3.98nm의 표면 거칠기를 얻을 수 있었다.

4. 결 론

본 연구는 알루미늄과 실리콘의 연성모드 절삭의 최적조건을 찾는 것이다. 따라서 이송속도, 절삭깊이, 절삭속도 등의 절삭조건을 변화시켜 초정밀가공 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 단결정 실리콘과 알루미늄 7075의 절삭실험 결과 알루미늄 7075가 단결정 실리콘에 비해 절삭력이 크게 나타났다.
2. 단결정 실리콘과 알루미늄 7075는 절삭깊이가 증가하면 절삭력은 절삭깊이에 비례해서 증가하는 경향을 보였다.
3. 단결정실리콘의 경우120m/min에서 160m/min의 주축속도에서 안정된 절삭력을 보이고, 알루미늄 7075의 경우 140m/min이상의 절삭속도에서 일정한 절삭력이 측정되었다.
4. 단결정실리콘과 알루미늄 7075는 5 μ m이하의 절삭깊이에서 모두 양호한 표면거칠기를 얻었고 절삭깊이 5 μ m에서 단결정 실리콘은 17.38nm, 알루미늄 7075는 3.98nm의 표면 거칠기를 얻을 수 있었다.

참고문헌

1. Fleming D. P., Thayer W. J., "Experimental dynamic stiffness and damping of externally pressurized gas-lubricated journal bearings," NASA TND-8270, pp. 1-27, 1976.
2. Akira Kinai, "Development of ultra-precision machine tools with high-stiffness," JSPE, Vol. 61, No. 12, pp. 1671-1676, 1995.
3. Ikawa, "Ultrprecision Metal Cutting-The Past, the Present and the Future," ann CIRP, Vol. 40, pp.587-594, 1991.

4. Leung T. T., Lee W. B. , Lu X. M. , “Diamond turning of silicon substeates in ductile-regime,” *Journal of Materials Processing Technology* 73, pp. 42-48, 1998.
5. Singh D. V., Sinhasan R., Wadhwa S. S. , “Dynamic performance of plain gas journal bearings.,” *Tribology international*, Vol. 15, pp. 33-41, 1984.
6. Yu Junyi, Yan Jiwang “Ultraprecision diamond turning of optical crystals SPIE,” Vol. 1994/5.
7. Pal, D. K., Majumdar, B. C., “Stability analysis of wxternally perssurized gas lubricated porous bearing with journal rotation. Part 1,” *Tribology international*, Vol. 17, pp. 83-91, 1984.
8. Pal, D. K. Majumdar, B. C., “Stability analysis of wxternally perssurized gas lubricated porous bearing with journal rotation. Part 1,” *Tribology international*, Vol. 17, pp. 92-98, 1984.
9. Ponalson, Thompson D. D., “Design and Performance of Small Precision CNC Turning Machine.ann. CIRP,” Vol. 35, pp. 373-376, 1986.
10. Brinksmerier E, Riemer O., “Tool and Setting for Improved Surface Finish in Diamond Turning,” *proc of int Precision Engineering*, pp. 5-133, 1993.