

# Al6061-T6의 선삭가공에서 가공조건에 따른 절삭특성 평가

최태규\*, 김정석<sup>+</sup>, 박진호<sup>++</sup>, 임학진<sup>+++</sup>  
(논문접수일 2009. 11. 03, 심사완료일 2009. 12. 01)

## The Machinability Estimation Depending on Cutting Condition in Al6061-T6 Turning Operations

Tae-Kyu Choi\*, Jeong-Suk Kim<sup>+</sup>, Jin-Hyo Park<sup>++</sup>, Hak-Jin Lim<sup>+++</sup>

### Abstract

Because of high specific stiffness, the aluminum alloy has been used for various industry field. Specially, the heat-treated aluminum alloy is difficult-to-machine material and machining test is necessary to evaluate and improve the machinability. In order to manufacture the functional part, appropriate cutting condition is selected by considering surface quality, machining time, and workpiece deflection by cutting force. In this investigation, the machinability of Al6061-T6 is estimated by changing cutting conditions. The variable cutting conditions are cutting speed, depth of cutting, and feed rate. The estimation is done by analysis of cutting force, surface roughness, and surface shape according to the change of cutting conditions.

**Key Words** : Al6061-T6, Turning operations(선삭작업), Heat-treatment(열처리), Cutting conditions(절삭조건), Machinability(절삭성), Cutting force(절삭력), Surface roughness(표면조도)

## 1. 서론

최근 금속 가공품들의 초 정밀화, 가공설계, 가공기술의 발전 및 가공부품의 개선에 힘입어 요구되는 정밀도가 크게 높아지는 추세이다.<sup>(1)</sup> 특히 알루미늄과 같은 연질금속의 초 정밀 선삭가공의 수요가 급증하고 있으며 이에 대한 기초 기

술, 응용 기술 및 가공 시스템 개발에 관한 연구가 활발하다. 또한 알루미늄의 가공에 있어서는 가공 공정에서 발생하는 잔류응력에 대한 불안정성 문제에 대하여 여러 방법을 사용하여 잔류응력을 줄이기 위한 기술개발이 수행되었으며, 급냉(Quenching)과정에서 발생하는 잔류응력은 냉각 후 냉간 압축(Cold compression) 또는 냉간팽창(Cold expansion)

\* 부산대학교 대학원 기계공학부  
+ 교신저자, 부산대학교 기계공학부, 정밀정형 및 금형가공 연구소(ERC/NSDM) (juskim@pusan.ac.kr)  
주소: 609-735 부산시 금정구 장전1동 산30번지 부산대학교  
++ 부산대학교 대학원 기계공학부  
+++ 풍산(주)

의 방법을 사용하여 감소시키는 방법들이 제안되고 있다.

일반적으로 알루미늄의 저온처리는 가열-급랭의 열처리 과정에서 발생하는 잔류 오스테나이트를 감소시키기 위하여 드라이아이스의 온도(-78.5℃)까지 냉각하여 일정시간 유지시키는 서브제로처리(Sub zero treatment)가 보편적으로 사용되고 있다. 최근 들어 저온기술의 발전과 더불어 철강분야에서 극저온처리에 대한 기술개발이 이루어지고 있다.<sup>(2,3)</sup>

철강분야의 열처리방법의 하나인 급랭처리는 재료의 급격한 냉각을 통하여 조직변화를 이루는 조작으로 빠른 시간에 이루어지기 때문에 재료 내부에 일부 분자는 불안정한 상태로 존재하게 된다. 즉, 급냉은 상온에서 종료되는 것이 아니라 절대온도0K(-273℃)에서 종료된다고 추정할 수 있다. 절대온도에서 분자운동이 없는 안정한 상태 즉, 모든 응력이 제거된 상태라고 할 수 있다.

대체적으로 열처리 후 형상 정밀도가 초기 주물이나 사출 형상 정밀도 보다 떨어지게 되며 이러한 문제점을 보완하기 위해 전체의 80%가 넘는 제품들이 형상 정밀도 향상을 위해 후처리로 절삭가공을 행하고 있다.<sup>(4)</sup>

절삭가공 시 절삭력은 소재 잔류응력 발생에 주요 인자가 된다. 또한 각 소재마다 가공방법과 절삭조건에 따라 잔류응력 발생량 각각 달라진다. 따라서 절삭가공시 소재에 따른 절삭조건 설정이 중요하다.<sup>(5)</sup>

본 연구에서 소재는 Al-Mg-Si계의 Al6061-T6의 가공에서 절삭속도, 절삭깊이, 이송속도 변화에 따른 절삭력, 표면 거칠기와 표면 형상의 변화를 관찰하여 절삭가공 시 절삭성을 평가하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

절삭가공 실험은 범용선반(Namsun hi-tech, 600×2000)을 사용하였으며, 실험장치의 제원과 실험에 사용된 실험장

Table 1 Specifications of experimental instruments

Instruments	Specifications
Lathe	Stepless speed driven lathe
Tool dynamometer	9257B(Kistler)
Amplitude	5019A(Kistler)
Tool microscope	Olympus(STM5-MJS2)
Surface tester	Taylor hobson surtronic 3+

치의 구성을 Table 1과 Fig. 1에 각각 나타내었다.

절삭력은 압전식 공구동력계(Kistler, 9257B)를 사용하여 측정하였고, 공구동력계로부터 미세한 전압을 안정적으로 증폭하기 위하여 전하증폭기(Charge amplifier, 5019A)를 사용하였다. 가공면의 표면 거칠기 측정은 촉침식 조도 측정기(Taylor hobson, Surtronic 3+)를 이용하여 측정하였고, 절삭가공 후 표면형상은 공구현미경(STM5-MJS2)을 사용하여 관찰하였다.

### 2.2 시험편 및 절삭공구

실험에 사용된 시험편은 Al6061-T6이며, 길이 200mm, 직경 100mm의 환봉을 Fig. 2와 같은 형상과 치수로 가공하여 사용하였다. 시험편은 서로 다른 절삭조건을 측정하기 위해서 요철 부분이 있는 형상으로 제작하였다.

실험에서 사용할 Al6061-T6 시험편은 미국 국방성 규격 MIL-A-22771D를 만족하는 소재를 사용하였으며, Table 2,

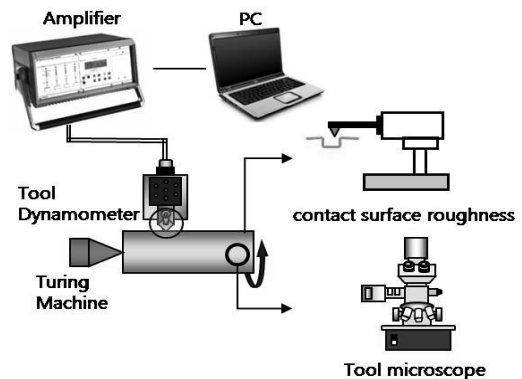


Fig. 1 Experimental setup

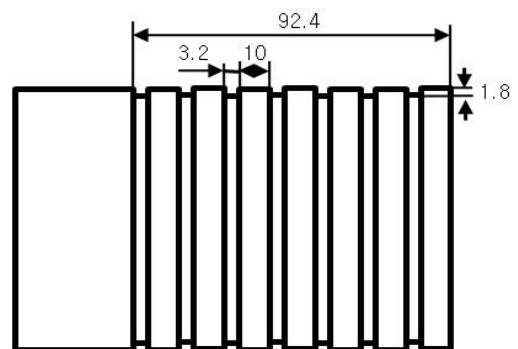


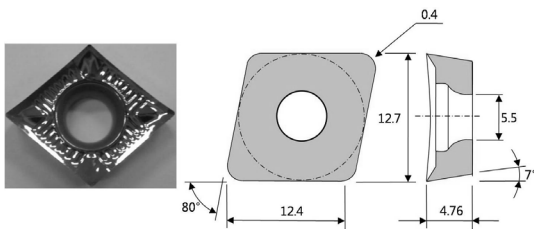
Fig. 2 Shape of workpiece

**Table 2 Chemical compositions(%) of Al6061-T6**

Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zi	Cr	Ti	Al
0.4	0.8	0.7	0.15	0.12	0.25	0.35	0.15	Remainder

**Table 3 Mechanical properties of Al6061-T6**

Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)	HB
262	241	7	91



**Fig. 3 Tool shape**

Table 3에 각각 화학적 성분과 기계적 성질을 나타내었다. Fig. 3에 보이는 절삭공구 형상은 알루미늄 전용 다이아몬드 코팅절삭공구로 노즈반경이 0.4mm, ISO 분류로 K10인 카바이드 인서트(CCGT120404-AK, Korloy)를 사용하였고 공구홀더는 외경 선삭용(SCLCR2525-M12 Korloy)을 사용하였다.

**2.3 실험 조건 및 실험방법**

실험에 사용된 절삭조건은 Table 4에 나타내었으며 절삭 속도, 이송속도, 절삭깊이의 변화에 따른 실험을 실시하였다. 절삭력 측정을 측정하기 위해 공구동력계를 범용선반의 복식 공구대(Compound tool post)에 지그를 이용해 설치하였고 표면조도 측정기는 시험편이 선반척에 고정된 상태에서 표면조도를 실시간 측정하기 위해 이동식 심압대에 고정하여 측정하였다. Fig. 2에 보이는 요철 윗부분 면(L=10mm)에 절

**Table 4 Cutting conditions**

Process parameter	Cutting Condition
Cutting speed [m/min]	100, 200, 300
Feed rate [mm/rev]	0.08, 0.135, 0.198
Depth of cut [mm]	1.0, 2.0, 3.0

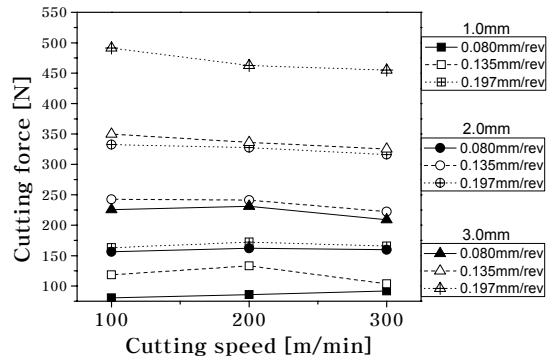
삭가공을 실시하였으며, 절삭력은 절삭저항이 가장 큰 주분력을 선정하여 측정하였다. 표면 거칠기는 Ra(Center-line average roughness)값을 측정하였고 각각 3번 측정하여 평균값으로 표시하였다.

**3. 실험결과 및 고찰**

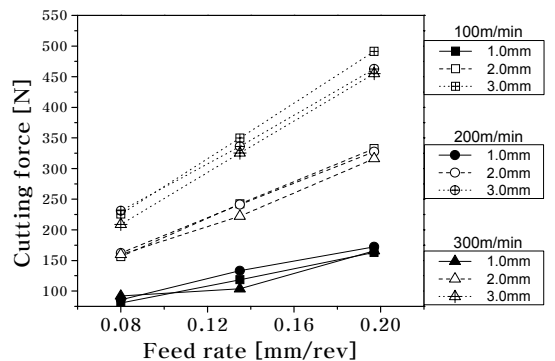
**3.1 절삭력**

Fig. 4는 절삭속도의 변화에 따른 절삭력 변화를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 절삭력은 절삭속도의 증가에 따라 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이는 알루미늄 가공 시 절삭속도가 증가하면서 소재의 인장력이 작아짐으로 칩 배출이 용이해진다. 또한 알루미늄 소재의 절삭가공 시 많이 발생하는 구성인선(Built up edge) 현상이 고속가공에서는 많이 감소하여 절삭력이 감소되는 것으로 사료된다.<sup>(6)</sup>

Fig. 5와 Fig. 6에서는 이송속도와 절삭깊이의 변화에 따



**Fig. 4 Cutting force according to cutting speed**



**Fig. 5 Cutting force according to feed rate**

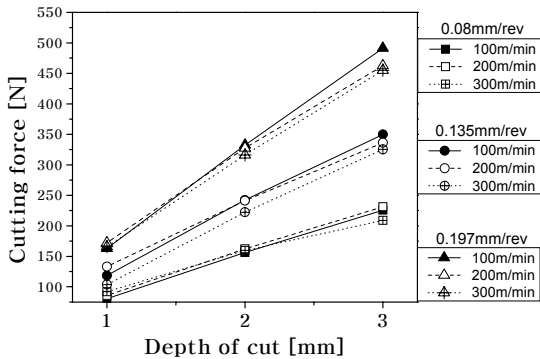


Fig. 6 Cutting force according to depth of cut

른 절삭력 변화를 보여주고 있다. 이송속도와 절삭깊이의 증가에 따라 절삭력이 증가하는 경향을 보여주고 있으며, 이는 이송속도와 절삭깊이가 증가하면서 칩 제거량(MRR: Metal Removal Rate)이 증가하면서 절삭력이 증가하는 것으로 보여진다.<sup>(7)</sup>

절삭력은 가공성 평가의 중요한 시험평가 방법의 하나이며 공구수명을 예측할 수 있는 중요한 인자가 되기도 한다. Al6061-T6의 선삭가공 시 단위 시간당 절삭능률이나 효율적인 절삭동력을 고려한다면 이송속도와 절삭깊이를 작게 선정하고 절삭속도는 크게 선정하는 것이 바람직하다고 판단된다.<sup>(8)</sup>

### 3.2 표면조도

Fig. 7은 절삭속도 변화에 따른 표면 거칠기의 변화를 나타내었다. 절삭속도가 증가 하면서 이송속도와 절삭깊이에

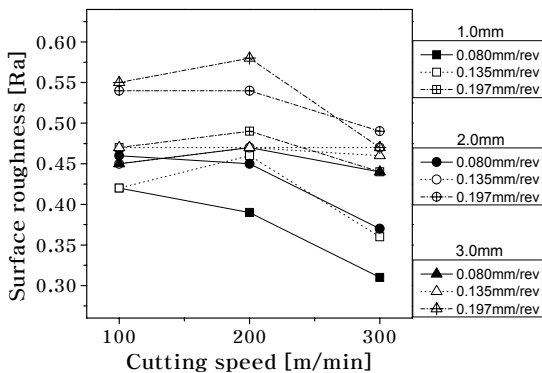


Fig. 7 Surface roughness according to cutting speed

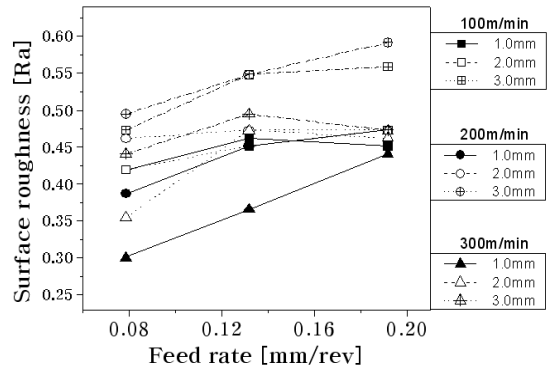


Fig. 8 Surface roughness according to feed rate

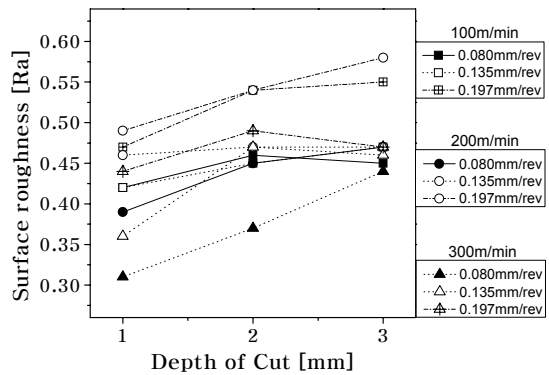


Fig. 9 Surface roughness according to depth of cut

따라 각기 다른 경향들을 보여주고 있다. 절삭깊이와 이송속도를 낮게 선정하고 절삭속도를 증가시키면 표면 거칠기가 감소하는 경향을 알 수 있다. 이는 알루미늄 가공에서 두드러지게 나타나는 현상으로 저속가공에서 구성인선이 많이 발생하지만 고속가공으로 갈수록 이러한 현상이 감소되어 표면조도가 좋아지는 것으로 사료된다.<sup>(9)</sup>

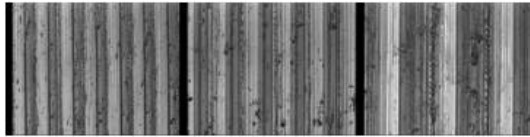
Fig. 8과 Fig. 9에서는 이송속도와 절삭깊이에 따른 표면조도 특성을 나타내었다. 이송속도와 절삭깊이가 증가 할수록 표면 거칠기가 나빠지는 것을 알 수 있다. 이는 이송속도와 절삭깊이가 증가할 경우 소재 제거율이 증가하고, 이에 따라 절삭저항이 증가하면서 표면 거칠기가 나빠진 것으로 사료된다.<sup>(10)</sup>

### 3.3 표면형상

Fig. 10은 절삭속도, 절삭깊이, 이송속도에 따른 각기 다른 조건들의 절삭가공 후 표면의 형상을 공구현미경으로 촬



100m/min      200m/min      300m/min  
**(a) Surface shape according to cutting speed**  
 (Feed rate 0.08mm/rev, Depth of cut 1.0mm)



0.08mm/rev      0.135mm/rev      0.197mm/rev  
**(b) Surface shape according to feed rate**  
 (Cutting speed 200m/min, Depth of cut 2.0mm)



1.0mm      2.0mm      3.0mm  
**(c) Surface shape according to depth of cut**  
 (Cutting speed 200m/min, Feed rate 0.197mm/rev)

**Fig. 10 Surface shape Photo**

영한 사진이다. 이송속도의 증가에 따라 공구 끝단과 공작물이 접촉한 부분의 간격이 넓어지는 것을 확인할 수 있고 절삭깊이의 증가에 따라 가공면이 매끄럽지 못하고 미세한 버도 관찰되고 있다. 앞선 표면 거칠기 측정에서 알 수 있듯이 절삭깊이와 이송속도 증가에 따라서는 표면형상이 양호하지 못한 반면 절삭속도의 증가에 따라 표면형상이 양호해지는 것을 관찰할 수 있다. 이송속도 0.08mm/rev에서 절삭깊이가 깊어질수록 가공패턴이 제거되는 현상은 적은 이송과 높은 절삭깊이로 인해서 미세한 칩의 배출이 용이하지 못해서 생성된 것으로 사료된다. Al6061-T6의 선삭가공 시 표면조도 및 표면형상을 고려한다면 절삭깊이와 이송속도를 작게 선정하고 절삭속도는 크게 선정하는 것이 바람직하다고 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서 잔류응력을 완화를 위해 저온열처리 된 Al-

Mg-Si계의 Al6061-T6 소재의 선반가공 시 절삭속도, 절삭깊이, 이송속도 변화에 따른 절삭력과 표면 거칠기, 가공면형상의 변화를 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 절삭력은 절삭속도 증가에 따라 감소하였으며 이송속도, 절삭깊이 증가에 따라 증가함을 나타내었다.
- (2) 표면 거칠기는 높은 절삭속도에서 양호한 값을 나타내었고, 이송속도와 절삭깊이의 증가에 따라 표면 거칠기 값이 나빠짐을 알 수 있었다.
- (3) 표면형상들을 절삭조건에 따라 분석한 결과 이송속도, 절삭깊이를 적게 선정하고 절삭속도는 크게 선정하는 절삭조건에서 표면형상이 양호하였다.

#### 후기

본 연구는 방위사업청 민군겸용기술개발사업 과제(09-DU-MP-02) 지원에 의해 이루어졌음.

#### 참고 문헌

- (1) Raymond G. O., 2002, "Comparison of stress relief procedures for cryogenic aluminum mirrors," NASA Tech. Report No. 20020061280, pp. 57~70.
- (2) Tom, C., 2008, May 2008, "A Study of Different Uphill Quenching Variacles on The Reduction of Residual Stress in Aluminum Alloys," <<http://www.croucher.us/UphillQnch-1.htm>>
- (3) Tom, C., 2009, "Minimizing Machining Distortion in Aluminum Alloys Thru Successful Application of Uphill Quenching - A Process Overview," ASTM standards and Engineering Digital Library, Vol. 4, pp. 1~20.
- (4) Lee, H. In., Han, Y. s., Kim, D. H., Kim W. T., 2009, "Comprehension and practical use of an aluminum application technology," The Korea Metal Journal, No. 3, pp. 249~255.
- (5) Joo, H. Y., Lee, Y. S., 1997, "A study on Residual stress at Cutting work," Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 6, No. 3, pp. 111~117.
- (6) Wit Grzesik, 2008, "Advanced Machining Processes of Metallic Materials, ELSEVIER, Great Britain, pp.

- 215~219.
- (7) Yusuf Ozcatalbas, 2003, "Chip and built-up edge formation in the machining of in situ Al4C3-Al composite," *Materials & Design*, Volume 24, Issue 3, May 2003, pp. 215~221.
- (8) Oh, S. H., 2004, "A Study on the Correlation between Machinability and the Cutting Condition in Machining Aluminum Alloy," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 3, No. 4, pp. 56~62.
- (9) Yum, Y. H., 2005, "New edition machine tool," Dong Mynug Publishing company, Korea, Vol. 18, pp. 28~42.
- (10) Lee, S. Y., Kim, G. H., Kim, H. S., Yang, S. C., Hong, C. D., Cho, B. M., Won, J. H., 2007, "A Study on the Characteristics of the High Speed Machining H. S several Tool Materials change of Ellipse M, C. Machining to be used in Millimete Wave IbeeC.mete System," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 6, No. 4, pp. 22~27.