

# AL6061-T4의 보링가공 시 절삭조건에 따른 직경 변화에 관한 연구

천세호\*<sup>#</sup>

\*계명문화대학교 기계과

## A study on the Change of Diameter Based on Cutting Conditions in AL6061-T4 Boring Machining

Se-Ho Chun\*<sup>#</sup>

\*Department of Mechanical Engineering, Keimyung College Univ.

(Received 16 March 2020; received in revised form 30 March 2020; accepted 14 April 2020)

### ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the effects of the change in the spindle speed and the feed rate on the diameter change of a hole using a boring cutter for the internal boring process of AL6061-T4 alloys. The experimental results are quantitatively analyzed by applying the factor analysis and the response surface analysis of the experimental design method. The tendency of the diameter change according to the change in the spindle speed and feed level is also evaluated. During the internal boring process of AL6061-T4 alloys, the main factor affecting the diameter change is the spindle speed in which the diameter decreases as the number of revolutions increases. In addition, the diameter tends to increase as the feed is increased; however, as the number of spindle revolutions increases, the influence of the feed decreases.

**Key Words :** Boring Cutter(보링커터), Hole Shrinkage(축공), Aluminum Alloy(알루미늄 합금), Full Factorial Design(완전요인설계), ANOVA(분산분석)

### 1. 서론

보링(boring)가공은 공작물에 이미 형성된 구멍을 확장하는 공정으로 주로 중삭 및 정삭에 적용되는 공정이다. 특히 치수 정밀도가 드릴 공정에 비해 매우 중요하며 형상적인 특성으로 인해 공작물의 재질, 진동, 가공조건 등에 따라 정밀도가 크게 좌우 된다.

관련 연구<sup>[1-4]</sup>에 따르면 보링 공구의 형상이 진동 발생의 주요 인자임을 알 수 있으며 표면형상에도 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 또한 절삭조건에 따라 동특성이 변화하기 때문에 공구형상과 더불어 절삭조건은 가공 품질을 결정짓는 중요한 변수로 볼 수 있다.

절삭조건에 따른 구멍 정밀도의 다양한 변화를 능동적으로 극복하고 가공 생산성을 높이기 위해 미세조절이 가능한 공구를 개발하여 탄소강(S45C steel)의 보링가공에 적용한 사례도 있다<sup>[5]</sup>.

일반적으로 공작물의 재종 및 기계적, 화학적 특

# Corresponding Author : [chunsh@kmcu.ac.kr](mailto:chunsh@kmcu.ac.kr)

Tel: +82-53-589-7621, Fax: +82-53-589-7372

성은 가공 품질에 많은 영향을 미친다. 특히 알루미늄 합금을 공작물로 선정된 최근 연구<sup>[6-8]</sup>에 따르면 절삭 가공 시 발생하는 열과 절삭력이 가공정밀도에 영향을 미친다는 사실이 밝혀졌다. 외경선삭에 관련된 연구<sup>[6]</sup>에 따르면 절삭속도가 증가할수록 절삭력이 감소하여 알루미늄 합금 공작물의 오차 및 변형이 줄어드는 경향을 보인다고 하였다. 반면 이송 속도와 절삭 깊이의 증가는 형상오차를 증가시키는 요인이라고 하였다. 또한 보링커터의 내경 가공에 관한 연구<sup>[4]</sup>에서는 주축 회전수가 높아질수록 가공경(cutting diameter)이 줄어드는 현상이 발생한다고 하였다.

이와 같이 알루미늄 합금은 절삭조건에 의해 가공품질이 다양하게 변화하기 때문에 이를 제어하기 위해서는 재종에 따른 가공특성을 파악해야 한다. 그리고 보링가공만으로 요구되는 정밀도를 달성할 수 있다면 공정의 효율화와 경제성 증대로 이어질 수 있을 것이다. 하지만 이전 연구<sup>[6-8]</sup>에 의하면 절삭조건 변화가 알루미늄 합금의 가공 정밀도에 영향을 미치는 요인이라고 규명하였으나 영향력의 정도나 크기에 관해서는 아직까지 연구가 이루어지지 않았다. 특히 실무에서는 현장 상황에 따라 절삭조건 모두를 변경할 수 없는 상황이 있을 수 있으므로 가공 정밀도에 미치는 영향력의 우선순위를 파악하여 효율적인 공정설계를 수행해야 한다.

이에 본 연구에서는 보링커터를 이용한 알루미늄 합금(AL6061-T4)의 내경 가공에서 주축 회전수 및 이송 속도의 변화가 구멍의 직경변화에 미치는 영향력의 정도와 경향을 파악하고자 하였다.

## 2. 연구 배경

### 2.1 스피indle 회전수와 축공 현상

보링가공 시 직경변화에 관한 최근 연구<sup>[4]</sup>에 따르면 Fig. 1과 같이 절삭열(cutting heat)에 의해 공작물의 직경 팽창이 발생하게 되고 확장된 직경만큼 미변형칩두께축소(undeformed chip shrinkage)가 발생하게 된다.

축소된 미변형칩두께는 공작물의 내부 에너지로 잔류하게 된다. 절삭공구(cutting tool)에 의해 가공

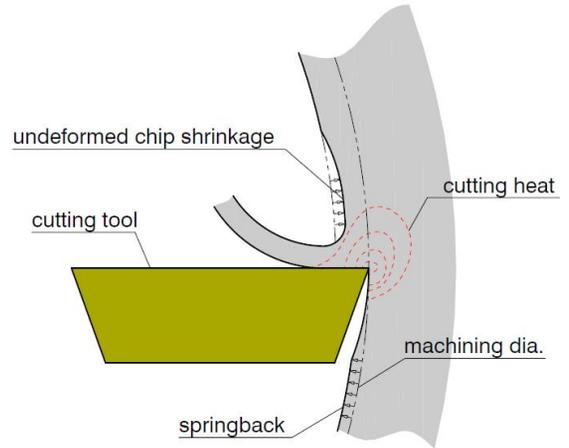


Fig. 1 Schematic diagrams of hole shrinkage

이 완료된 후 공작물이 냉각되면 탄성 복원(springback)에 의해 가공경(machining dia.)보다 줄어드는 축공현상(hole shrinkage)이 발생한다고 하였다. 특히 본 연구에서 선정한 알루미늄 합금의 경우 강보다 열팽창계수(coefficient of thermal expansion)가 높아 미변형칩두께축소량이 클 것으로 예상된다.

### 2.2 홀더변형에 의한 구멍크기 변화

AL6061 가공에 관련된 최근 연구<sup>[8]</sup>에서는 절삭조건이 절삭력(cutting force)에 영향을 미치는 유효한 요인이라고 하였다. 특히 실험결과에서 테이블 이송(table feed, mm/min)가 높아질수록 주절삭분력(tangential cutting force)이 선형적으로 상승하는 결과를 보였다. 반면 공구의 회전수와 절삭력은 반비례하는 경향을 보였다. 이에 본 연구에서는 절삭력의 영향이 크게 나타날 수 있는 저속 영역(spindle speed 2,000~6,000rpm)을 연구범위로 설정하였다.

Fig. 2는 상용 절삭해석 소프트웨어를 활용하여 AL6061-T4의 보링가공 해석결과를 나타낸 것이다. 설정된 조건은 공구직경 30mm, 주축 회전수 4,000rpm, 회전당 이송 0.1mm/rev, 그리고 절입깊이 0.5mm로 설정하였으며 공구 노즈반경(nose radius)은 0.8mm로 하였다. 그림은 절삭이 시작된 이후 0.021초에서 0.026초일 때의 상태를 나타내었다.

최대온도는 약 600℃이며 주절삭분력과 배분력은 보링커터의 변형을 유발할 수 있다. 반면 이송분력

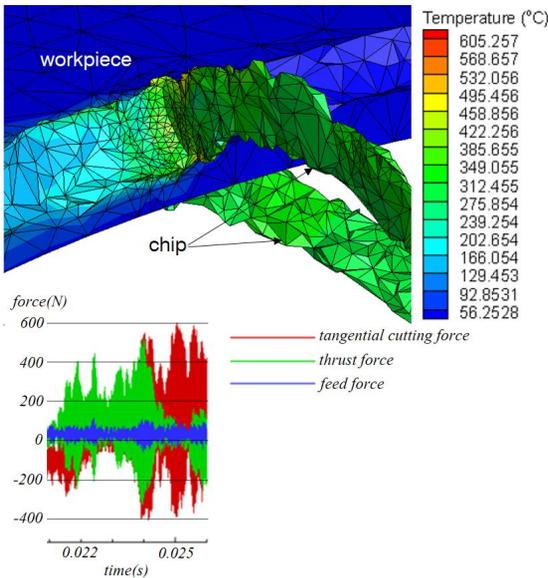


Fig. 2 Boring machining simulation

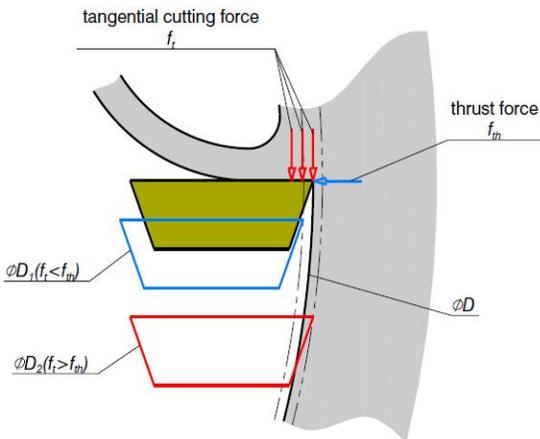


Fig. 3 Hole dia. variation by cutting force

(feed force)은 미미하여 공구의 축방향 변형은 고려하지 않는 것이 타당하다고 볼 수 있다.

Fig. 3은 절삭력의 영향으로 보링커터가 변형하게 되면 절삭날의 위치가 바뀌게 되는 기구를 나타낸 것이다. 주절삭분력( $f_t$ )보다 배분력( $f_{th}$ )이 우세하게 되면 원래 가공하고자 했던 직경( $\phi D$ )보다 감소( $\phi D_1$ )하게 될 것이다. 반면 주절삭분력이 우세하게 되면 직경이 증가( $\phi D_2$ )됨을 예측할 수 있다. 이를

통해 이송조건 변화에 따른 가공 직경 변화의 원인을 설명할 수 있으리라 판단된다.

### 3. 실험 및 고찰

#### 3.1 1차 실험설계

본 실험에서는 주축 회전수와 이송(회전당 이송, mm/rev)을 독립변수로 선정하였고 반경 방향 절입 깊이는 0.5mm로 고정하였다. 1차 실험의 목적은 선정된 독립변수가 수준(level) 변화에 따른 효과를 분석하기 위함으로 Fig. 4와 같이 중앙점이 있는 완전 요인설계를 채택하였다. 그리고 모든 실험점에서 반복실험을 하지 않으면서 변동의 추정과 검정력을 증가시키기 위해 중심점(0,0)을 5개로 설계하였다. 절삭조건은 Table 1과 같으며 고려되지 않은 인자의 영향이 모든 실험마다 골고루 영향을 미치도록 무작위 순서대로 진행하였다.

Fig. 5는 CNC 밀링머신(T4000<sup>TM</sup>, Doosan Machine Tools)에 장착된 공작물(AL6061-T4)과 공구를 나타낸 것이다. 공구는 직경 30mm를 가공할 수 있는 보

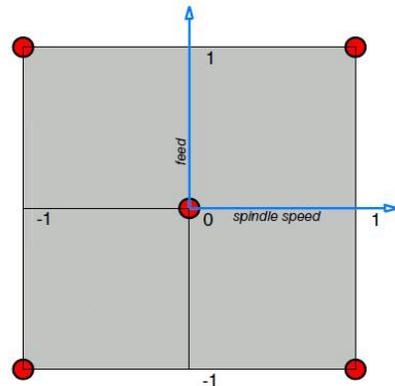


Fig. 4 1<sup>st</sup> experiment design

Table 1 Cutting conditions for 1<sup>st</sup> experiment

| factors             | level |       |       |
|---------------------|-------|-------|-------|
|                     | -1    | 0     | 1     |
| spindle speed (rpm) | 2,000 | 4,000 | 6,000 |
| feed (mm/rev)       | 0.05  | 0.1   | 0.15  |



Fig. 5 Cutting tool and workpiece

링커터를 제작하여 사용하였고 알루미늄 합금 가공용 인서트(SPGG090408DA K10, TaeguTec)를 장착하였다. 특히 인선의 런아웃(runout) 영향을 제거하기 위해 1개의 인서트만 장착하도록 설계하였다. 그리고 알루미늄 합금 가공 시 구성인선(built-up edge)의 영향을 최소화하기 위해 절삭유를 주입하는 습식가공의 형태로 진행하였다. 가공 종료 후 3차원 측정기(CORDAX RS-50 DCC, Sheffield)를 사용하여 구멍의 직경을 측정하여 분석하였다.

### 3.2 1차 실험결과 해석

Fig. 6에서는 pareto chart(response:hole diameter)를 통해 유의한 요인을 확인하고자 하였다. 95% 신뢰수준(significance level)으로 주축 회전수와 이송이 통계적으로 효과가 있다고 판단할 수 있으며 교호효과(interactions)는 유의하지 않음을 추정할 수 있

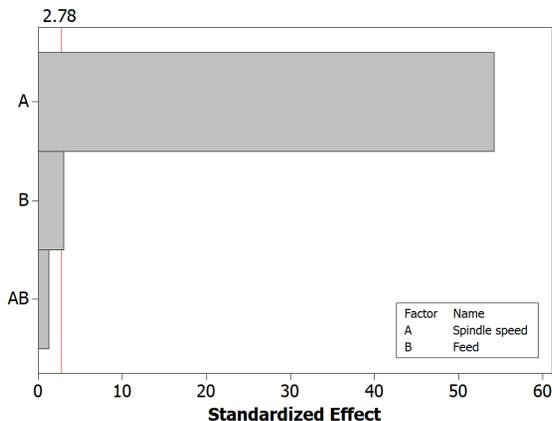


Fig. 6 Pareto chart of the standardized effects

Table 2 Analysis of variance for 1<sup>st</sup> experiment

| Source         | DF | SS         | MS         | F       | P     |
|----------------|----|------------|------------|---------|-------|
| Main Effects   | 2  | 0.00794600 | 0.00397300 | 1471.48 | 0.000 |
| Interactions   | 1  | 0.00000400 | 0.00000400 | 1.48    | 0.290 |
| Curvature      | 1  | 0.00105609 | 0.00105609 | 391.14  | 0.000 |
| Residual Error | 4  | 0.00001080 | 0.00000270 |         |       |
| Pure Error     | 4  | 0.00001080 | 0.00000270 |         |       |
| Total          | 8  |            |            |         |       |

다. 그리고 이송에 비해 주축 회전수가 직경 변화에 미치는 영향력이 크다는 것을 알 수 있다.

Table 2에서 분산분석(analysis of variance)으로 통해 주효과(main effects), 교호효과, 그리고 곡률효과(curvature)에 대해 정량적으로 분석하였다. 그 결과 Fig. 6에서와 같이 주효과와 곡률효과가 신뢰수준 내에서 유의한 것으로 확인할 수 있다. 특히 곡률효과가 유의미하다는 것은 절삭조건에 따른 직경 변화가 비선형적으로 거동한다고 볼 수 있다. 이에 비선형적 변화 경향을 파악하기 위해서는 추가실험을 통해 반응의 곡면성을 파악할 필요가 있다.

### 3.3 2차 실험설계

추가되는 실험은 Fig. 7과 같이 회전성 부여와 동일한 예측분산을 위해 원주상에 축점(axial points)을 배열한 중심합성설계(central composite design,

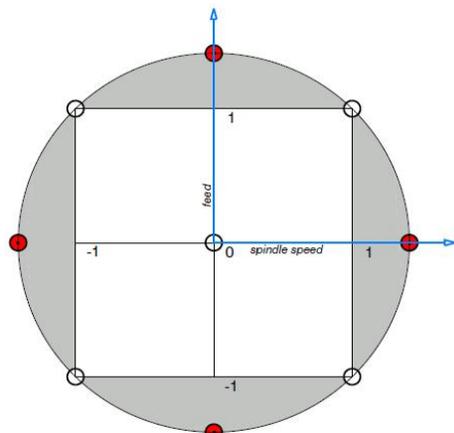


Fig. 7 2<sup>nd</sup> experiment design

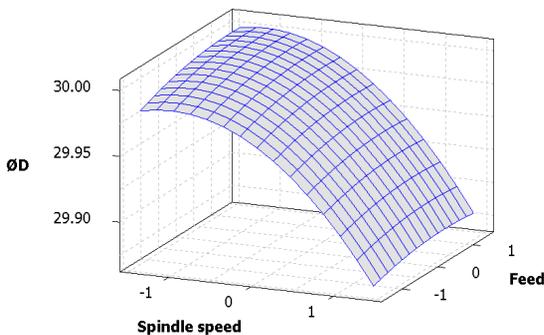
**Table 3 Additional conditions for 2<sup>nd</sup> experiment**

| factors                | level    |         |
|------------------------|----------|---------|
|                        | -1.41421 | 1.41421 |
| spindle speed<br>(rpm) | 1,172    | 6,828   |
| feed<br>(mm/rev)       | 0.03     | 0.17    |

CCD)를 활용하였다. 추가되는 4개의 실험점에 대한 조건은 Table 3과 같다.

### 3.4 2차 실험결과 해석

2차 실험에 대한 분산분석 결과는 Table 4와 같다. 1차 실험과 마찬가지로 신뢰수준 내에서 교호 효과는 유의하지 않으며 추정된 모델에 대한 적합성 결여(lack of fit)가 관찰된다. 하지만 본 연구에서는 정교한 모델링 구축이 아니라 요인의 수준 변화에 따른 반응을 살펴보고자 하였기 때문에 교호 효과를 포함하여 반응표면(response surface)을 관찰하였다. 2차 실험을 통해 구축된 반응표면은 Fig. 8과 같다. 반응표면에 따르면 주축 회전수가 증가함에 따라 직경이 감소하며 이송이 증가함에 따라 미약하게 직경이 커지는 경향을 관찰할 수 있다. 이는 앞서 제시하였던 축공 현상과 홀더변형에 의한 구멍 크기 변화 기구에 대해 설명할 수 있는 결과라 볼 수 있다. 또한 이송 증가에 따른 직경 증가는 주절삭분력이 배분력보다 우세함을 나타내는 지표라 해석할 수 있다. 반면 4,000rpm보다 높은 주축 회전수에서는 이송증가에 따른 구멍 크기 변화가 뚜렷하게 관찰되지 않는데 절삭열이 특정 임계점을



**Fig. 8 Response Surface plot**

**Table 4 Analysis of variance for 2<sup>nd</sup> experiment**

| Source         | DF | SS       | MS       | F      | P     |
|----------------|----|----------|----------|--------|-------|
| Blocks         | 1  | 0.000015 | 0.000015 | 0.79   | 0.409 |
| Regression     | 5  | 0.016000 | 0.003200 | 166.62 | 0.000 |
| Linear         | 2  | 0.013818 | 0.006909 | 359.73 | 0.000 |
| Square         | 2  | 0.002178 | 0.001089 | 56.71  | 0.000 |
| Interactions   | 1  | 0.000004 | 0.000004 | 0.21   | 0.664 |
| Residual Error | 6  | 0.000115 | 0.000019 |        |       |
| Lack of Fit    | 2  | 0.000104 | 0.000052 | 19.34  | 0.009 |
| Pure Error     | 4  | 0.000011 | 0.000003 |        |       |
| Total          | 12 |          |          |        |       |

넘어서게 되면 공작물이 연화되어 절삭력이 낮아져 홀더변형에 미치는 영향력이 감소 되었기 때문이라 판단된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 AL6061-T4의 내경 보링가공을 통해 주축 회전수 및 이송의 변화가 구멍의 직경 변화에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 완전요인 설계와 중심합성설계를 적용하여 정량적으로 결과를 분석하였고 절삭조건 변화에 따른 직경 변화 경향을 해석하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 알루미늄 합금(AL6061-T4)의 내경 보링 가공에서 직경은 주축 회전수 변화에 가장 민감하며 회전수가 증가할수록 직경은 줄어든다.
2. 이송이 증가함에 따라 직경이 증가하는 경향을 보이며 회전수가 높아질수록 이송에 대한 영향력은 줄어든다.
3. 생산현장에서 직경 변화를 최소화하고 생산성을 높이기 위해서는 스피들 회전수보다 이송을 증가시켜 소재제거량을 증가시키는 전략이 바람직할 것으로 판단된다.

## REFERENCES

1. Chun, S. H., and Ko, T. J., "Study on the dynamic stiffness variation of boring bar by Taguchi Method," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 8, No. 3, pp. 98-104, 2009.
2. Chun, S. H., and Ko, T. J., "A Study on the Dynamic Response Characteristics of Lathe Boring Bar," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 27, No. 8, pp. 62-69, 2010.
3. Chun, S. H., Liu, J. W., Kim, J. H., and Ko, T. J., "A study on the surface roughness behavior based on the response characteristics of boring bar," *Proceedings of Korean Society of Precision Engineering*, pp. 117-118, 2010.
4. Chun, S. H., "A Study on the Change in Hole Precision with Slenderness Ratio of Boring Cutter," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 16, No. 5, pp. 7-12, 2017.
5. Hwang, J. D., Heo, Y. N., Oh, J. Y., Jung, Y. G., and Cho, S. L., "A Study on the Development of a Step Cutter with Hybrid Process of Drilling and Boring," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 7, No. 3, pp. 30-35, 2008.
6. Lee, M. J., Hwang, Y. K., and Lee, C. M., "A Study on the Development of Analysis Model for Prediction of Relative Deformation between Cutting Tool and Workpiece," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 27, No. 4, pp. 20-26, 2010.
7. Tash, M., Samuel, F. H., Mucciardi, F., Doty, H. W., and Valtierra, S., "Effect of metallurgical parameters on the machinability of heat-treated 356 and 319 aluminum alloys," *Materials Science and Engineering:A*, Vol. 434, Issues 1-2, pp. 207-217, 2006.
8. Park, H. K., Lee, S. M., Lee, C. S., Chae, S. S., Lee, W. S., Choi, Y. S., Jo, H. T., Baek, Y. J., and Lee, J. C., "A Study on the Characteristics of High-Speed Small-Diameter Wipe Milling for Al6061," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 11, No. 3, pp. 24-28, 2012.