

다구찌 실험 계획법을 활용한 평삭 가공에서의 표면 거칠기에 대한 절삭조건 영향 분석

서동현*, 권예필*, 김영재**,***, 최환진**,****, 전은채*.,#

*울산대학교 첨단소재공학부, **한국기초과학지원연구원 연구장비운영부 기술지원팀,
충남대학교 분석과학기술대학원, *충남대학교 기계공학부

Effects of Cutting Parameters on Surface Roughness in Planing Using Taguchi Method

Dong-Hyun Seo*, Ye-Pil Kwon*, Young-Jae Kim**,***, Hwan-Jin Choi**,****, Eun-chaee Jeon*.,#

*School of Materials Science and Engineering, University of Ulsan,

**Engineering Support Team, Center for Research Equipment, Korea Basic Science Institute,

***Graduate School of Analytical Science and Technology, Chungnam National University,

****School of Mechanical Engineering, Chungnam National University

(Received 27 April 2021; received in revised form 10 May 2021; accepted 17 May 2021)

ABSTRACT

The complex effects of the machining parameters make it is difficult to control and predict surface roughness. The theoretical surface roughness observed during mechanical machining with a round tool is determined by the tool radius and pitch. However, it was revealed that other parameters, such as the depth of cut and cutting speed, also affect surface roughness. This study adapted the Taguchi method, which can analyze the effects of cutting parameters quantitatively with an efficient number of experiments, to optimize the parameters for better surface roughness. Experiments were designed based on an orthogonal array, and the quantitative effects on the surface roughness were analyzed using the S/N ratio. The surface roughness was affected by all parameters, especially the tool radius. The optimum cutting parameter values obtained in this study showed better surface roughness than the other combinations of the parameters.

Key Words : Surface Roughness(표면 거칠기), Planing(평삭 가공), Taguchi Method(다구찌 실험 계획법), Cutting Parameters(절삭조건), Optimization(최적화)

1. 서 론

최근 AR(Augmented Reality)과 이미지 센서와 같은 광학 기술의 수요가 증가함에 따라 금형 제작,

패턴 가공 등의 높은 정밀도를 요구하는 산업의 필요성이 증가하고 있다^[1]. 이러한 산업에서 기계 가공방식을 활용하여 표면 거칠기를 제어하는 것은 필수적이며 요구되는 표면 거칠기의 수준 또한 점차 높아지고 있다. 그러나 표면 거칠기는 많은 조건들에 의해 복합적인 영향을 받기 때문에 절삭조건 최적화를 위한 실험 회수가 지나치게 많아야 하

Corresponding Author : jeonec@ulsan.ac.kr

Tel: +82-52-712-8053, Fax: +82-52-712-8045

며 각 조건들이 미치는 영향에 대한 정량적인 분석이 어려운 문제점이 있다. 이에 합리적인 실험 회수만으로 조건들의 개별적인 영향을 정량적으로 확인하여 높은 수준의 표면 거칠기를 도달할 수 있는 분석 방법이 필요하다. 기존에는 절삭조건들을 경험에 의존하여 선정해왔으며 nm수준의 표면 거칠기에서 절삭조건별 영향을 효율적인 실험 회수로 분석하는 연구가 부족하였다^[2,3]. 따라서 본 연구에서는 적은 수의 실험 회수로 각 조건의 영향을 체계적으로 분석할 수 있는 실험 계획법인 다구찌 실험 계획법을 활용하여 각 조건들이 표면 거칠기에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였으며 최적 절삭조건을 선정하였다.

2. 이론적 배경

2.1 평삭 가공에서의 표면 거칠기

본 연구에서는 경면 수준의 표면 거칠기를 목표로 하여 원형 공구를 이용한 평삭 가공을 실시하였다. 이때 경면 가공은 Fig. 1과 같이 이루어지고 표면 거칠기(Surface Roughness)는 식 (1)과 같이 이송거리(f)의 제곱에 비례하며 공구 반지름(r)에 반비례한다^[4,5]. 이상적으로 가공이 이루어지는 경우 식에 따라 이송 거리와 공구 반지름에 의해 표면 거칠기가 결정되지만, 실제 가공 시 두 가지 절삭조건 이외의 많은 조건들이 표면 거칠기에 영향을 미친다고 알려져 있다^[6-9]. 표면 거칠기에 실제로 영향을 미치는 조건들 중 대표적인 절삭조건은 절삭 깊이와 절삭 속도가 있다. 절삭 깊이는 절삭력과 배분력 등에 영향을 주어 표면 거칠기에 영향을 미치며 작을수록 우수한 표면 거칠기를 얻을 수 있으며^[4,10], 절삭 속도의 경우 가공 중 공구 전방에 형성되는 Built-up Edge(BUE)에 영향을 주며 빠를수록 표면 거칠기가 좋아진다고 알려져 있다^[2,11]. 본 연구에서는 이론적으로 표면 거칠기를 결정하는 공구 반지름과 이송거리와 더불어 이론적으로 영향을 미치지 않지만 실제로는 표면 거칠기에 영향을 준다고 알려진 절삭 깊이와 절삭 속도를 절삭조건으로 선정하였다.

$$Roughness \approx \frac{f^2}{8r} \quad (1)$$

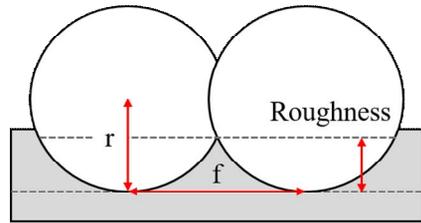


Fig. 1. Geometric parameters of machining with round nose tool

2.2 다구찌 실험 계획법

앞서 제시한 절삭조건은 4가지이므로 각 조건별로 3수준의 실험을 실시할 경우에 81가지의 조합이 나타난다. 81번의 실험을 하는 것은 비효율적이므로 본 연구에서는 실험 계획법 중 하나인 다구찌 실험 계획법을 활용하였다. 다구찌 실험 계획법은 각 조건들이 균등하게 분포되는 직교표를 사용하며 결과값을 바탕으로 실험 조건별 신호 대 잡음비(S/N ratio)를 계산하여 각 조건의 영향을 비교 분석하고 최적값을 선정할 수 있다는 특징이 있다^[6,10]. 각 조건들이 균등하게 분포된 직교표를 사용하면 모든 조건을 실험하였을 때에 비해 실험 회수를 줄일 수 있으며 조건들의 상호작용에 의한 영향을 최소화하여 조건들의 개별적인 영향을 효과적으로 분석할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 L9 직교표를 사용할 수 있으며 이 경우 총 9가지의 실험 조건 조합으로 분석이 가능하다. 실험을 통해 얻은 데이터는 망대, 망목, 망소 특성에 따라 신호 대 잡음비를 계산한다. 적은 잡음 요소와 높은 신호 반응에서 최적 조건이 결정되므로 신호 대 잡음비 값이 가장 클 때의 실험 조건을 최적 조건으로 선정한다. 또한 같은 실험 조건 내에서 신호 대 잡음비의 최대값과 최소값의 차이가 클수록 해당 실험 조건의 영향이 크다고 판단한다.

3. 실험방법

본 연구에서는 Fig. 2와 같은 절삭가공시스템(새한나노텍)과 단결정 다이아몬드 소재의 원형 공구를 이용하여 100mm*100mm*11mm 크기의 황동 소재의 시편을 대상으로 직선 운동 기반의 평

삭 가공을 실시하였다. 이송 거리 100 μ m, 절삭 깊이 5 μ m, 절삭 속도 200mm/sec을 황삭 조건으로 하였으며, 공구 교체 시 시편까지의 거리에 대한 정보를 제설정해야하기 때문에 공구 교체 시 황삭 조건으로 2회 반복 가공을 실행하였다. 또한 가공하기 전 시편의 표면 거칠기에 의한 영향을 최소화하기 위하여 각 조건별 3회 반복 가공하였다. 표면 거칠기 측정은 비접촉식인 백색광 간섭계를 사용하였으며 표면 거칠기를 나타내는 여러 표시법 중 R_z (10점 평균 거칠기)를 사용하여 분석하였다. R_z 는 측정 영역 내에서 가장 높은 산과 가장 낮은 골 각 5개 간 차이의 평균으로 식 (1)에서 제시한 이론 표면 거칠기와 의미가 가장 유사하다.

본 연구에서는 앞서 선정한 공구 반지름, 이송 거리, 절삭 깊이와 절삭 속도를 절삭조건으로 선정하여 각 조건별로 3개의 수준으로 나눈 후 L9 직교표를 사용하여 Table 1과 같이 배열하였다. 이를 통해 실험 횟수를 모든 경우를 실험하였을 때의 81회에서 9회로 약 90% 줄일 수 있었다. 결과값인 표면 거칠기는 작을수록 좋은 망소 특성으로 식을 통해 각 실험 조건별 신호 대 잡음비를 계산하였다.

Table 1 Design of experiments by taguchi method

No.	Tool Radius (mm)	Pitch (μ m)	Depth of Cut (μ m)	Cutting Speed (mm/sec)	Ideal R_{max} (nm)
1	10	32	1	200	12.80
2	10	44	3	150	24.20
3	10	70	5	250	61.25
4	50	32	3	250	2.56
5	50	44	5	200	4.84
6	50	70	1	150	12.25
7	25	32	5	150	5.12
8	25	44	1	250	9.68
9	25	70	3	200	24.50

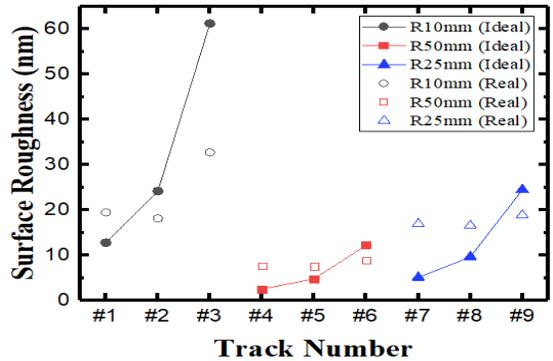


Fig. 3 Comparison of ideal and real surface roughness with cutting parameters

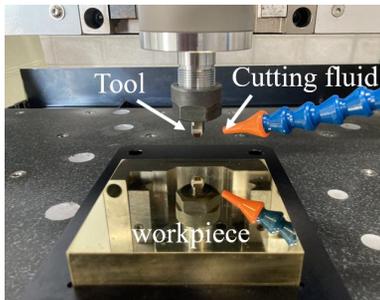


Fig. 2 A planing system and a workpiece



Fig. 4 Photos of tool tips after machining

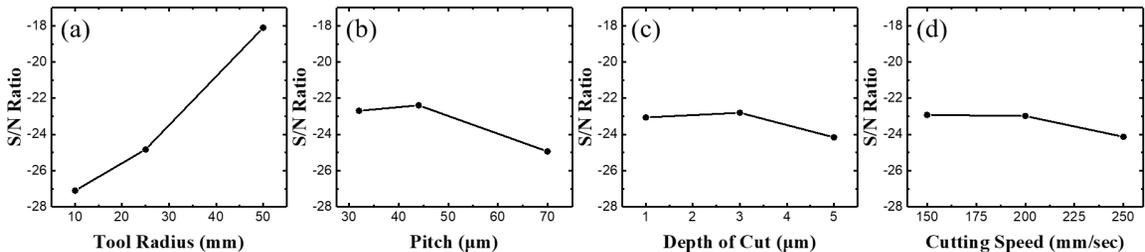


Fig. 5 S/N ratios of (a) tool radius, (b) pitch, (c) depth of cut and (d) cutting speed

4. 결과 및 고찰

직교표의 조건에 따라 가공한 후 측정된 표면 거칠기를 이론 표면 거칠기와 비교한 그래프를 Fig. 3에 나타내었다. 식 (1)을 통해 계산한 이론 표면 거칠기와 측정된 실제 표면 거칠기 사이의 차이는 있었지만 이론 표면 거칠기가 증가하였을 때 실제 표면 거칠기도 증가하는 경향은 동일했다. 공구 마모에 의한 영향을 확인하기 위해 가공 후 공구의 반지름을 광학 현미경을 통해 확인한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 가공 후 공구 표면에 마모 현상이 관찰되지 않았으므로 공구 마모에 의한 영향은 없는 것으로 판단한다. 표면 거칠기에 각 조건들이 미치는 영향은 앞서 설명한 바와 같이 직교표의 각 절삭조건별 신호 대 잡음비를 계산하고 각 조건 수준에 따라 비교하여 정량적으로 분석하였다.

4.1 공구 반지름 (Tool Radius)

공구 반지름의 변화에 따른 신호 대 잡음비를 Fig. 5(a)에 나타내었으며, 공구 반지름이 클수록 신호 대 잡음비가 증가하여 50mm에서 가장 높은 신호 대 잡음비를 나타내었다. 즉, 공구 반지름이 클수록 우수한 표면 거칠기를 얻을 수 있었으며, 고려한 4가지 절삭조건 중 신호 대 잡음비의 차이가 가장 크기 때문에 표면 거칠기에 지배적인 영향을 미치는 것으로 판단한다. 원형 공구를 이용한 평삭 가공에서 이상적으로 가공되는 경우 식 (1)과 같이 표면 거칠기는 공구 반지름에 반비례하여 공구 반지름이 증가할수록 표면 거칠기는 감소한다. 공구 반지름이 클 때 우수한 표면 거칠기를 얻을 수 있다는 경향은 동일하였다. 그러나 공구 반지름이 어느 이상 커지게 되면 공구와 피삭재가 접촉하는 면적이 커지고 배분력이 증가하여 가공 시 진동을 야기해 표면 거칠기에 영향을 미칠 수 있기 때문에^[4] 적절한 크기의 공구 반지름을 선택하는 것이 권장된다. 이에 본 연구에서 고려한 범위의 공구 반지름에서 최적 조건은 50mm로 결정하였다.

4.2 이송 거리 (Pitch)

이송 거리 변화에 따른 신호 대 잡음비를 Fig.

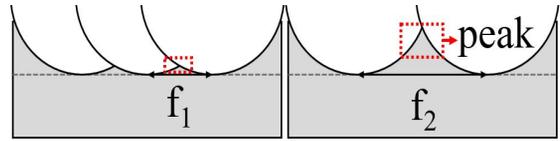


Fig. 6 Effect of pitch to sharpness of peak by machining with round nose tool

5(b)에 나타내었으며 44 μ m에서 가장 높은 신호 대 잡음비를 보였다. 이송 거리는 작을수록 표면 거칠기가 우수해진다고 알려져 있지만, 최적 조건인 44 μ m는 설정한 범위 중 중간 수준에 해당하며 약 50 μ m이하의 이송 거리 조건에서 비슷한 수준의 표면 거칠기를 보였다. 이상적으로 가공되는 경우 식 (1)과 Fig. 6에서 보는 바와 같이 표면 거칠기는 이송 거리의 제곱에 비례하여 영향의 정도가 클 것 이라 예상하였지만, 실제로는 이송 거리의 감소에 따른 표면 거칠기의 변화는 이론보다 미약하게 나타났다. 이는 실제 가공에서는 Fig. 6에 점선으로 표시된 영역의 뾰족한 산 부분이 이송 거리가 작아짐에 따라 이상적으로 형성되는 것이 아니라 뭉툭하게 형성되면서 이송 거리에 따른 영향이 줄어드는 것으로 판단된다. Table 1의 실험 조건 4와 5를 비교하였을 때 이론 표면 거칠기의 상대 차이는 약 2배 정도지만 절대 차이는 약 2nm로 매우 작았으며 측정된 실제 표면 거칠기의 차이는 약 0.1nm정도로 유사하였다. 따라서 약 50 μ m이하의 이송 거리 조건에선 이송 거리가 감소함에 따른 표면 거칠기 감소량이 매우 작기 때문에 다른 조건의 영향이 비교적 커지는 것으로 생각된다.

4.3 절삭 깊이 (Depth of Cut)

절삭 깊이의 변화에 따른 신호 대 잡음비를 Fig. 5(c)에 나타내었으며 설정한 범위 중 중간 수준인 3 μ m에서 가장 높은 신호 대 잡음비를 보였다. 절삭 깊이가 증가하였을 때 표면 거칠기가 나빠졌으며 3 μ m이하의 절삭 깊이에서 영향의 정도가 작아지는 것으로 확인되었다. 절삭 깊이가 증가하면 공구와 피삭재가 접촉하는 면적이 커져 표면 거칠기가 나빠질 것이라 생각되어 절삭 깊이가 작을수록 표면 거칠기가 우수할 것이라 예상하였

으며, 전반적으로 이와 유사한 양상을 나타내었다. 단, 절삭 깊이 1 μ m와 3 μ m에서 비슷한 수준의 표면 거칠기를 보였는데, 이는 수십 mm의 공구 반지름에서 μ m수준의 절삭 깊이가 감소하면 절입각이 급격히 감소해 배분력이 증가하며 절삭 깊이가 감소에 의한 영향이 작아지는 것으로 생각된다.

4.4 절삭 속도 (Cutting Speed)

절삭 속도 변화에 따른 신호 대 잡음비를 Fig. 5(d)에 나타내었으며 절삭 속도의 최적 조건은 150mm/sec이다. 느린 절삭 속도에서 우수한 표면 거칠기를 얻을 수 있었으며, 본 연구에서 고려한 4가지 절삭조건 중 가장 작은 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 절삭조건에 따라 가공 중 공구 전방에 BUE가 형성되며 이를 해결하는 방법으로 절삭 속도를 증가시키는 것이 일반적이다. 그러나 본 연구에서는 반대로 빠른 절삭 속도에서 표면 거칠기가 나빠졌다. 이는 직선 운동을 기반으로 작동하는 기계 가공 방식은 가감속 구간이 존재하므로 장비 성능 이상의 절삭 속도에서는 절삭 속도 증가에 따른 BUE가 감소보다 기계 진동의 증가로 인해 빠른 절삭 속도에서 표면 거칠기가 나빠지는 현상이 발생한 것으로 판단된다.

4.5 최적 절삭조건 선정 및 고찰

본 연구에서 다구찌 실험계획법을 활용해 선정

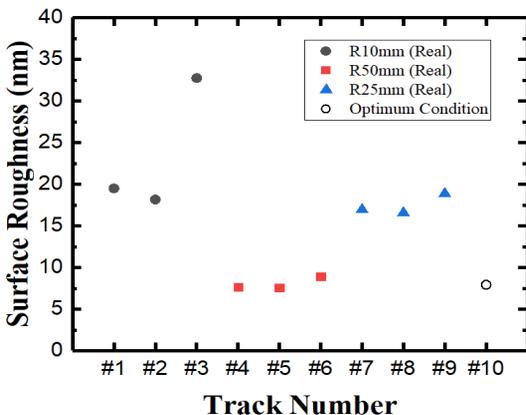


Fig. 7 Comparison of surface roughness with the optimum parameters of cutting condition

한 최적 절삭조건은 공구 반지름 50mm, 이송 거리 44 μ m, 절삭 깊이 3 μ m, 절삭 속도 150mm/sec이며, 최적 조건을 검증하기 위해 최적 조건으로 평삭 가공을 실시하였다. 최적 조건과 다른 조건에서의 표면 거칠기를 Fig. 7에 나타내었으며, 최적 조건에서 가공했을 때 표면 거칠기가 개선되었다. 앞서 분석된 바와 같이 공구 반지름이 가장 영향이 크므로 최적 조건이 아닌 10mm와 25mm 공구 반지름 조건에 비해 표면 거칠기가 크게 개선이 되었으며, 공구 반지름이 최적 조건인 4, 5, 6번 조건에서도 일부 개선되는 것을 확인하였다. 이를 통해 다구찌 실험계획법을 활용하여 효율적인 절삭조건 최적화가 가능함을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 다구찌 실험계획법을 활용하여 평삭 가공에서의 표면 거칠기에 영향을 미치는 절삭조건들에 대하여 정량적으로 분석하여, 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 공구 반지름은 클수록 우수한 표면 거칠기를 얻을 수 있었으며, 50mm에서 가장 우수한 표면 거칠기를 얻을 수 있었다. 본 연구에서 고려한 4가지 절삭조건 중 가장 지배적인 영향을 미쳤다.
2. 이송 거리의 최적 조건은 44 μ m이며, 약 50 μ m이하의 이송 거리 조건에선 영향의 정도가 미약하였다. 기존에 알려진 이론에 비하여 영향의 정도가 미약하게 나타났다.
3. 절삭 깊이의 최적 조건은 3 μ m이며, 절삭 깊이가 감소함에 따라 표면 거칠기가 감소하였다. 이는 공구와 피삭재 간의 접촉하는 면적 변화에 의한 것으로 판단된다.
4. 절삭 속도의 최적 조건은 150mm/sec이며, 고려한 절삭조건 중 미치는 영향이 가장 작았다. 느릴수록 우수한 표면 거칠기를 얻을 수 있었으며, 이는 절삭 속도 증가에 의한 BUE의 감소보다 장비 진동의 증가에 의한 현상으로 생각된다.
5. 본 연구에서 선정된 최적 조건으로 실시한 가공에서 표면 거칠기가 다른 조건에 비하여 개선됨을 통해 다구찌 실험계획법을 활용한 효율적인 절삭조건 최적화를 할 수 있음을 확인하였다.

후 기

이 논문은 산업통상자원부의 산업기술혁신사업 일환인 “근적외선 흡수 고내열 투명광학필름 및 적외선 필터모듈 개발(No. 20011084)”과 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2019R111A3A01054545)의 지원에 의한 것입니다.

REFERENCES

1. Je, T. J., Choi, D. S., Jeon, E. C., Park, E. S., and Choi, H. J., "Trends of flat mold machining technology with micro pattern," *Journal of Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 11, No. 2, pp. 1-6, 2012.
2. Korkut, I., and Donertas, M. A., "The influence of feed rate and cutting speed on the cutting forces, surface roughness and tool-chip contact length during face milling," *Materials & Design*, Vol. 28, No. 1, pp. 308-312, 2007.
3. Zhang, J. Z., Chen, J. C., and Kirby, E. D., "Surface roughness optimization in an end-milling operation using the Taguchi design method," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 184, No. 1-3, pp. 233-239, 2007.
4. Seo, N. S., *Engineering of Machining*, Dong Myeong Publishers, pp. 191-217, 2002.
5. Cheung, C. F., and Lee, W. B., "Characterisation of nanosurface generation in single-point diamond turning," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 41, No. 6, pp. 851-875, 2001.
6. Asiltürk, I., and Akkuş, H., "Determining the effect of cutting parameters on surface roughness in hard turning using the Taguchi method," *Measurement*, Vol. 44, No. 9, pp. 1697-1704, 2011.
7. Thomas, M., Beauchamp, Y., Youssef, A. Y., and Masounave, J., "Effect of tool vibrations on surface roughness during lathe dry turning process," *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 31, No. 3-4, pp. 637-644, 1996.
8. Hua, Y., and Liu, Z., "Effects of cutting parameters and tool nose radius on surface roughness and work hardening during dry turning Inconel 718," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 96, No. 5, pp. 2421-2430, 2018.
9. Patel, V. D., and Gandhi, A. H., "Analysis and modeling of surface roughness based on cutting parameters and tool nose radius in turning of AISI D2 steel using CBN tool," *Measurement*, Vol. 138, pp. 34-38, 2019.
10. Nalbant, M., Gökçaya, H., and Sur, G., "Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning," *Materials & Design*, Vol. 28, No. 4, pp. 1379-1385, 2007.
11. Airao, J., Chaudhary, B., Bajpai, V., and Khanna, N., "An experimental study of surface roughness variation in end milling of super duplex 2507 stainless steel," *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, No. 2, pp. 3682-3689, 2018.