

Al 6061의 드릴가공에서 공구코팅과 공정변수가 표면정도에 미치는 영향

최 만 성[†]

[†]한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

Effect of Coating and Machining Parameters on Surface Finish in Dry Drilling of Aluminium 6061

Man Sung Choi[†]

[†]School of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education

Abstract

In this paper, the performance of uncoated- and Titanium nitride aluminium TiAlN-PVD coated- carbide twist drills were investigated when drilling aluminium alloy, Al 6061. This research focuses on the optimization of drilling parameters using the Taguchi technique to obtain minimum surface roughness and thrust force. A number of drilling experiments were conducted using the L9 orthogonal array on a CNC vertical machining center. The experiments were performed on Al 6061 material 1 blocks using uncoated and coated HSS twist drills under dry cutting conditions. Analysis of variance(ANOVA) was employed to determine the most significant control factors. The main objective is to find the important factors and combination of factors influence the machining process to achieve low surface roughness and low cutting thrust force. From the analysis of the Taguchi method indicates that among the all-significant parameters, feed rate are more significant influence on surface roughness and cutting thrust than spindle speed.

Key Words : Drilling, Coated-uncoated drill, Al 6061, Taguchi method, Optimization

1. 서 론

기계가공 분야에서 드릴가공은 양적으로 높은 비중을 차지할 뿐 만 아니라 트러블의 원인이 되기 쉽다고 하는 점에서 많은 연구를 요하는 분야이다[1]. 알루미늄 합금 같은 경량금속은 야금학적인 성질과 물리적인 성질을 잘 이용하여 항공재료, 반도체장비재료로 널리 쓰이고 있다. 알루미늄합금의 종류는 주조용 알루미늄합금과 가공용 알루미늄합금으로 대별되고 주조용 알루미늄합금은 다시 실루민, 라우탈, 하이드로날륨, Y합금, 로우엑스로 나누어지고, 가공용 알루미늄합금은 두랄루민, 초두랄루민, 하이드로날륨, 알민, 알드리, 알클래드 등으로 분류된다. 이러한 종류에 따라 알루미늄합금은 각각의 장점과 단점을 갖고 있는데 항공재료는 대체적으로 무게에 대한 강도 비가 높고, 우수한 내식

성과 탄성률이 낮다는 장점을 갖고 있다. 그러나 대부분의 알루미늄합금은 절삭성이 떨어지는 난삭재이며 가공 시에 공구에 용융되어 점착되는 경향을 가지고 있어서 공구의 파손이 자주 일어난다. 난삭재의 주요한 특징은 가공 경화성과, 인성이 높고 절삭 날에 용착하기가 쉬우며 열전도율이 낮다는 점이다. 또한 알루미늄합금은 낮은 열전도율로 인해 공구와 피삭재 사이의 온도를 증가시켜 공구의 수명에도 영향을 미친다. 이러한 재료의 성질로 인해서 절삭 날에 부가되는 절삭저항이 크므로 칩핑(chipping)이나 절삭 날의 결손이 생기기 쉬우며, 열이 피삭재 전체로 전달되기 어렵기 때문에 드릴의 절삭 날 온도의 상승으로 인한 강도를 떨어뜨려 마모의 진행을 촉진시키므로 수명이 짧아진다. 또한 칩이 절단되지 않고 드릴에 엉켜 붙어 칩을 처리하는데 어려움이 많다[2-4]. 이러한 가공특성을 가진 알루미늄은 가공조건과 공구의 선정 등에서 많은 제약이 주어진다. 알루미늄합금의 드릴가공 시 성능을 향

[†]E-mail : mschoi@koreatech.ac.kr

상시키는 가장 중요한 변수는 공구의 코팅 유무로 알려져 있다. 또한 드릴가공 시 높은 절삭력(thrust force)과 낮은 표면거칠기를 들 수 있다. 일반적으로 절삭력이 크면 공구마모를 증가시키고, 표면거칠기를 악화시켜 표면다듬질과 디버링(deburring)의 후 가공을 필요로 한다. 이러한 문제로 인해 드릴공구에 특수코팅을 필요로 하고, 금속제거율(metal removal rate, MRR)에 변동이 생겨 생산성에 영향을 주기도 한다[5-7]. 이러한 문제해결에 Taguchi법은 널리 사용되는 방법 중 하나이다[8-10]. 본 연구의 목적은 가공현장에서 그 수요가 많으면서도 난삭재인 Al 6061을 사용하여 다구찌 기법에 의한 절삭성능을 검토하고 표면정도를 향상시키는 최적 절삭조건을 구하는데 그 목적이 있다.

2. 실험방법

2.1. 실험장치

Fig. 1은 본 실험에서 사용된 실험장치 및 기기로서 CNC 머시닝 센터, 공구 동력계, 증폭기 (charge amplifier), A/D 컨버터(converter)로 구성된 실험장치의 구성도이다. Table 1에서는 실험에 사용된 Al 6061의 화학적 성질을 나타내었다. 이 재료의 인장강도는 450 Mpa, 밀도는 2.8 g/mm³이다. 사용된 초경드릴은 4 Flutes Point 형상을 갖추고 칩의 배출이 원활하고 주강, 주철, 비철금속, 플라스틱 등의 폭넓은 용도로 사용된다. 초경공구는 경도가 다이아몬드에 가까운 정도로 극히 높고, 고온에서 내산화성이 뛰어나다. 그러므로 고속도강보다 더 고속으로 절삭할 수 있다. 절삭공구로서의 초경 합금은 피삭재의 종류에 따라서 P, M, K의 세가지

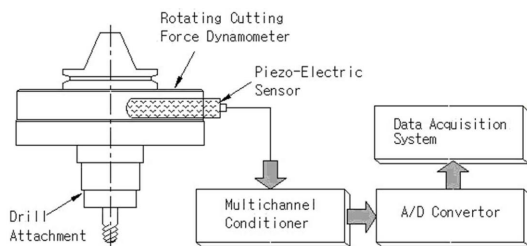


Fig. 1. Schematic diagram of experiment.

Table 1. Chemical composition of Al 6061. [wt,%]

Cu	Si	Mg	Zn
0.15~0.4	0.4~0.8	0.8~1.2	0.25이하
Mn	Cr	Fe	Al
0.15이하	0.04~0.35	0.7이하	잔량

종류로 분류된다.

Fig. 2는 실험에 사용된 CNC 수직형 머시닝센터이며, 사용된 피삭재는 Al 6061으로 그 크기는 110 mm × 100 mm, 각 구멍의 간격은 15 mm × 15 mm, 그리고 시편 당 18개의 드릴 구멍을 뚫어 실험을 하였다. 시편 가공은 피삭재를 평밀링을 통하여 표면가공을 하고, G 코드를 입력하여 가공하였다.

Fig. 3은 TiAlN-PVD 코팅한 초경드릴(좌측)과 코팅하지 않은 초경드릴(우측)로 각각 실험을 하였다. TiAlN 코팅은 물리적증착(PVD)의 일종으로 티타늄질화알루미늄 코팅을 통하여 공구의 높은 경도와 저항성을 보유하여 전반적인 내마모성을 향상시키는 것으로 알려져 있다. 공구의 제원은 초경드릴비트 H4401이고 TiAlN 코팅 한 것과 하지 않은 것으로 실험하였다. 각 공구의 비틀림각은 30°, 날끝각 118°, 드릴직경공차는 h8이다. Table 2는 실험에 사용한 장비의 제원이다.



Fig. 2. CNC vertical machining center set-up.

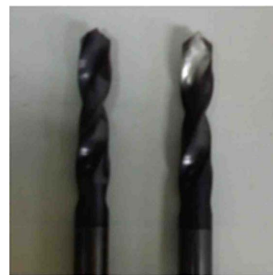


Fig. 3. Coated and uncoated carbide tool.

Table 2. Specification of experiment device.

Name	Model	Co. Ltd
CNC vertical M/C	TNV-80A	Tong-Il heavy Ind.
Tool dynamometer	5223A	KISTLER
Surface Roughness Measurement Device	SURF 5000	MAHR

2.2. 다구찌법(Taguchi method)

Taguchi기법의 목적은 잡음에 강한 설계를 하는 것이다. 생산현장은 재료의 다양함, 작업자의 부주의, 통제 불가능한 외부환경 등이 있다. 따라서 Taguchi기법은 잡음의 영향을 최소화하고 제어 가능한 영향력이 강한 인자를 찾아내어 잡음의 영향력을 최소화하는 강건설계(robust design)가 핵심이다. 이러한 강건설계에 필요한 기법이 S/N(signal and noise)비이다. 망소특성(smaller the better characteristics)인 경우의 S/N(signal to noise)비는 다음과 같다.

$$S/N = -10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (1)$$

여기서, y_i 는 실험에서 얻어진 데이터이고 n 은 실험의 횟수를 의미한다. 식(1)을 통하여 드릴실험의 실험값인 표면거칠기와 절삭력에 대한 S/N 비를 구하였다. Table 3은 다구찌법에 의한 실험설계표를 나타낸 것이다. 여기서 공구의 회전속도(spindle speed)의 단위는 [rev/min]이고, 이송량(feed rate)의 단위는 [mm/rev]이다. 실험조건은 알루미늄 합금의 절삭성을 검토하기 위해서 절삭속도, 이송속도를 각각 3수준으로 한 직교배

Table 3. Cutting parameters and their levels.

Factors	Symbol	Parameters	Levels		
			1	2	3
Control	A	Spindle speed	400	800	1200
	B	Feed rate	0.1	0.15	0.2
Noise	N ₁	coated			
	N ₂	uncoated			

Table 4. Experimental results for Ra and their corresponding S/N ratio of coated- and uncoated- drill.

Inner array		Outer array			
A	B	Ra(C)	S/N(C)	Ra(UC)	S/N(UC)
1	1	0.7345	2.68016	1.4540	-3.2513
1	2	1.2565	-1.98325	1.8605	-5.3926
1	3	1.6805	-4.50877	1.8090	-5.1488
2	1	1.1250	-1.02305	2.6950	-8.6112
2	2	1.4330	-3.12492	1.6565	-4.3838
2	3	2.1605	-6.69109	1.5670	-3.9014
3	1	1.6915	-4.56544	1.3450	-2.5744
3	2	1.4645	-3.31379	1.6150	-4.1635
3	3	1.6010	-4.08783	3.6060	-11.1405

열표를 이용하여 반복 실험을 실시하였다.

Table 3에 따라 실험한 결과 TiAlN-PVD 코팅한 고속도강 드릴에 의한 표면거칠기의 특성값과 S/N비는 Table 4와 같다. Table 4는 L₉(3²)의 실험배치법에 의한 것으로 표면거칠기의 단위는 [μm]이다. 여기서 C는 코팅된 드릴, UC는 코팅되지 않은 드릴, S/N 비는 잡음에 대한 신호의 비를 나타낸다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 표면거칠기의 정규성검정

많은 통계적 절차는 데이터가 정규분포를 따른다고 가정한다. 이러한 가정을 확인하기 위하여 데이터에 대한 정규성검정(normality test)을 수행할 필요가 있다. 여기서는 Anderson-Darling검정을 사용하였다. 이 검정은 경험적 누적분포함수를 기초로 한 검정방법으로 좋은 검정력을 가지며, 분포의 높은 값과 낮은 값들에서 정규성으로부터 이탈을 탐지 하는데 특히 효과적이다. Fig. 4는 표면 거칠기의 정규확률도를 95% 신뢰구간으로 나타낸 것으로 A²=0.216에 해당되는 p-값이 0.776으로 유의수준 5%보다 크므로 귀무가설을 채택하고, 정규분포를 따른다고 판정한다.

3.2. S/N비의 분산분석

Table 4의 자료에 의해 분산분석(ANOVA)을 하면 Table 5와 6과 같은 결과를 얻을 수 있다. 분산분석은 공정의 파라미터를 분석하기 위한 한 방법으로 각 인자들이 특성치에 미치는 유의성을 검정할 수 있다. Table 5에서 P의 값을 살펴보면 10% 유의수준에서 이송량과 스핀들 회전속도는 유의하지 않다. 즉 수준 간에 차이가 없다는 의미이다. 마찬가지로 Table 6에서 P

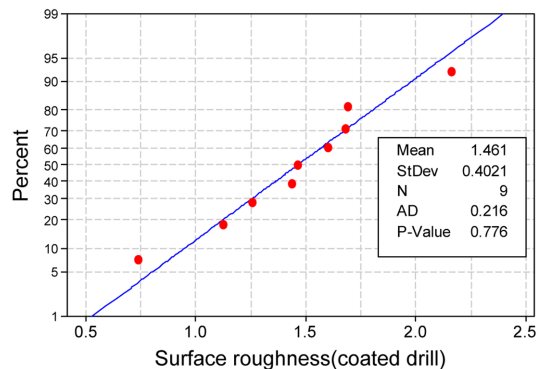


Fig. 4. Normal probability plot of surface roughness (coated drill).

Table 5. ANOVA analysis for surface roughness Ra with coated drill.

Source	df	Seq. SS	Adj. MS	F	P
A	2	0.2569	0.1264	1.21	0.389
B	2	0.6220	0.3110	2.97	0.162
Error	4	0.4186	0.1046		
Total	8	1.2935			

Table 6. ANOVA analysis for surface roughness Ra with uncoated drill.

Source	df	Seq. SS	Adj. MS	F	P
A	2	0.3480	0.1740	0.21	0.818
B	2	0.6409	0.3204	0.39	0.701
Error	4	3.2931	0.8233		
Total	8	4.2820			

Table 7. S/N ratio of level for smaller the better characteristics.

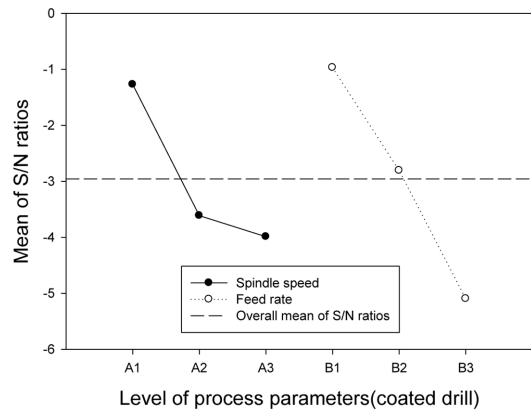
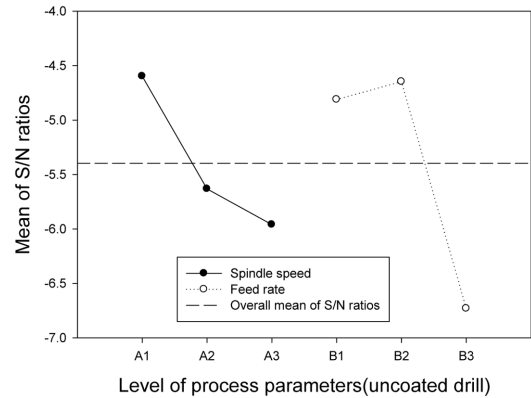
Level	A(C)	B(C)	A(UC)	B(UC)
1	-1.2706	-0.9694	-4.598	-4.812
2	-3.6130	-2.8073	-5.632	-4.647
3	-3.9890	-5.0959	-5.959	-6.730
Delta	2.7184	4.1265	1.362	2.084
Rank	2	1	2	1

의 값을 살펴보면 10% 유의수준에서 이송량과 스피들 회전속도는 유의하지 않다. 그러나 코팅된 드릴과 코팅되지 않은 드릴에서, 절삭조건이 표면거칠기에 미치는 영향은 차이가 있는데 코팅된 드릴이 무코팅보다 표면거칠기에 더 큰 영향을 미친다고 볼 수 있다.

3.3 가공조건의 주 효과

Table 7의 반응표에는 각 요인수준에 대해 각 반응특성(인자의 수준별 S/N비)의 신호 대 잡음비를 나타낸 것으로, 이 표에는 효과의 상대적 크기를 비교할 수 있는 델타 통계량에 따른 순위를 나타내었다. 이 표에서 볼 때 코팅의 유무에 관계없이 표면거칠기는 이송량이 스피들속도보다 더 민감하게 작용한다는 것을 알 수 있다. 표면거칠기가 적으면 적을수록 좋은 망소특성으로 본다면 대체적으로 스피들속도와 이송량이 적을수록 더 양호한 표면거칠기를 얻을 수 있다.

Fig. 5와 6은 코팅된 드릴과 코팅되지 않은 드릴을 사용하여 스피들속도와 이송량의 S/N비에 대한 주요

**Fig. 5.** Main effects plot (data mean) for S/N ratios (coated drill).**Fig. 6.** Main effects plot (data mean) for S/N ratios (uncoated drill).

과도를 나타낸 것이다.

여기서 볼 때 이송량이 스피들속도보다 표면거칠기에 더 민감하다는 것을 알 수 있다. 또한 대체적으로 이송량이 적을수록 표면거칠기가 최소화된다.

3.4 가공조건에 따른 추력(thrust force)

Table 3에 따라 실험한 결과 코팅공구에 의한 드릴 추력 F_z 의 특성값과 S/N비는 Table 8과 같다. Table 8은 $L_9(3^2)$ 의 실험배치법에 의한 것으로 추력의 단위는 [N]이다.

Table 8의 자료에 의해 분산분석(ANOVA)을 하면 Table 9와 같은 결과를 얻을 수 있다. Table 9에서 P의 값을 살펴보면 10% 유의수준에서 이송량과 스피들 회전속도는 유의하지 않다. 즉 수준 간에 차이가 없다는 의미이다. 마찬가지로 Table 9에서 P의 값을 살펴보면

Table 8. Experimental results for thrust force F_z and their corresponding S/N ratio of coated drill.

Inner array		Outer array	
A	B	F_z [N]	S/N
1	1	735.24	-57.3286
1	2	930.82	-59.3773
1	3	1120.49	-60.9882
2	1	688.48	-56.7578
2	2	924.06	-59.3140
2	3	1103.30	-60.8539
3	1	637.40	-56.0882
3	2	933.33	-59.4007
3	3	1136.65	-61.1125

Table 9. ANOVA analysis for thrust force F_z of coated drill.

Source	df	Seq. SS	Adj. MS	F	P
A	2	1,260	630	0.61	0.587
B	2	282704	141352	136.84	0.000
Error	4	4132	1033		
Total	8	288096			

10% 유의수준에서 스피들 회전속도는 유의하지 않고, 이송량은 매우 유의함을 알 수 있다. 따라서 이송량의 크기에 따라 추력은 더 민감하다고 할 수 있다. 이것은 표면거칠기에 미치는 영향이 스피들 회전속도보다 이송량이 더 큰 것과 유사하다. 따라서 절삭추력과 표면거칠기는 어떤 함수관계가 있음을 시사한다. 이것은 다음 절의 상관분석에서 설명된다.

Fig. 7은 S/N비에 대한 주효과 그림으로 앞에서 설명한 내용과 마찬가지로 추력에 대한 영향이 스피들 회전수보다 더 크다는 것을 보여주는 것이다. 또한 이 그림에서 알 수 있듯이 추력을 최소화하는 최적조건은 이송량이 적을수록 좋다.

3.5. 상관분석(correlations analysis)

절삭조건 별로 표면거칠기와 추력의 관계를 알기 위해 상관분석을 해보면 표면거칠기와 추력의 관계를 알 수 있다. Table 4와 Table 8의 자료에서 상관분석을 해 보면 추력 F_z 와 표면거칠기 Ra의 Pearson 상관계수는 0.569이고, P-값은 0.11로 나타났다. 따라서 표면거칠기와 추력의 부호가 양이라는 것은 추력이 크면 표면거칠기도 클 것이라는 것을 시사하고 있다. 모상관계수 검

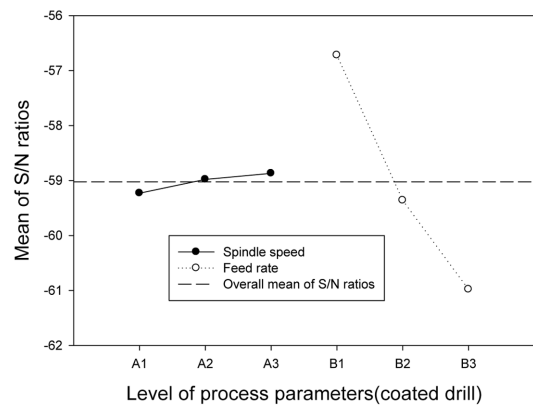


Fig. 7. Main effects plot (data mean) for S/N ratios (coated drill).

정통계량의 확률 값은 0.11로 유의수준 0.05보다 크므로 귀무가설을 기각하지 못한다. 즉 표면거칠기와 추력의 관계는 선형관계가 있다고 결론을 내릴 수 없다.

4. 결 론

본 연구의 목적은 드릴가공에 있어서 난삭재인 Al 6061인 피삭재를 사용하여 TiAlN-PVD 코팅한 고속도강 드릴과 코팅하지 않은 고속도강 드릴로 실험을 하여 최적조건을 구한 것이다. 절삭 실험한 결과 코팅하지 않은 고속도강 드릴의 표면거칠기는 스피들속도와 이송량에 민감한 반응을 보이지 않았고, TiAlN-PVD 코팅한 고속도강 드릴의 실험에 있어서는 이송량이 스피들속도보다 더 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 추력에 있어서는 코팅한 드릴과 그렇지 않은 드릴 모두 이송량에 민감한 영향을 보였고, 이송량이 적은 조건에서 추력이 최소화되었다. 그러나 예상외로 스피들속도는 추력에 관련이 적은 것으로 나타났다. 코팅한 드릴의 경우 각 절삭조건을 관찰매체로 변수인 표면거칠기와 추력을 상관분석 결과에 의하면 표면거칠기와 추력은 선형관계가 있다고 할 수 없다. 결론적으로 난삭재인 Al 6061을 드릴 가공할 경우 표면정도를 향상시키기 위해서는 코팅한 드릴을 사용하고 이송량을 최적화시킬 필요가 있다.

참고문헌

1. Tonshoff, K., Spintig, W., König, W., "A. Machining of Holes Developments in Drilling Technology", Ann. CIRP Vol. 43, No. 2, pp. 551-561, 1994.

2. Feng, C.X.J., Wang, X., "Development of Empirical Models for Surface Roughness Prediction in Finish Turning," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Vol. 20, pp. 348-356, 2002.
3. Chen, J. C., Lou, M. S., "Fuzzy-Nets Based Approach to using an Accelerometer for an in-Process Surface Roughness Prediction System in Milling Operation," *Int. Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 13, pp.358-368, 2000.
4. Osman M.O.M., Latinovic V., Greuner B., "On the Performance of Cutting Fluids for BTA Deep-Hole Machining of Cutting Fluids for BTA Deep-Hole Machining," *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 19, No. 5, pp. 491-503, 1981.
5. Frelle, H., "Progress in Physical Vapor Deposited Wear Resisting Coatings on Tools and Components", *Ann. CIRP* Vol. 37, pp. 165-169, 1988.
6. Hedenqvist, P., Olesson, M., Wallen, P., Kassman, A., Hogmark, S. Jacobson, S., "How TiN Coatings Improve the Performance of High Speed Steel Cutting Tools", *Surface Coatings Technol.* Vol. 41, pp. 243-256, 1990.
7. Young, C.T., Rhee, S. K., "TiN Coatings on Drills for Wear Reduction", *Sov. J. Friction Wear*, Vol. 7, No. 1, pp. 26-30, 1986.
8. Kurt, M., Bagci, E., Kaynak, Y., "Application of Taguchi Methods of Cutting Parameters for Surface Finish and Hole Diameter Accuracy in Dry Drilling Processes," *International Journal of Advanced Manufacturing Tech.* Vol. 40, pp. 458-469, 2009.
9. Tsao, C. C., Hocheng, H., "Evaluation of Thrust Force and Surface Roughness in Drilling Composite Material using Taguchi Analysis and Neural Network", *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 203, pp. 342-348, 2008.
10. Asilturk, I., Akkus, H., "Determining the Effect of Cutting Parameters on Surface Roughness in Hard Turning using the Taguchi Method", *Measurement* Vol. 44, pp. 1697-1704, 2011.

접수일: 2015년 6월 3일, 심사일: 2015년 6월 15일,
게재확정일: 2015년 6월 22일