

표면거칠기와 절삭력을 고려한 Al7075-T0 선삭가공 최적화

정지훈⁺, 김정석*, 김평호⁺⁺, 구준영⁺⁺, 임학진⁺⁺, 이종환⁺⁺⁺

(Manuscript received: Aug, 21, 2012 / Revised: Sep, 17, 2012 / Accepted: Sep, 20, 2012)

Machining Optimization of Al7075-T0 Turning Process Considering Surface Roughness and Cutting Forces

Jihoon Jeong⁺, Jeongsuk Kim*, Pyeongho Kim⁺⁺, Joonyoung Koo⁺⁺, Hakjin Im⁺⁺, Jonghwan Lee⁺⁺⁺

Abstract

The Response Surface Method(RSM) is used as optimal design technique of experimental conditions. In Al7075-T0 turning operation, the principle cutting force and the Center-line averaged roughness are measured to optimize machining process. In variation of feed, depth of cut and cutting speed, three cutting parameters are evaluated. The optimal cutting conditions of Al7075-T0 turning are suggested by RSM. As a main result, feed is the dominant cutting parameter in this turning process considering surface roughness and cutting force.

Key Words : Response surface method(반응표면법), Design of experiments(실험계획), Optimal cutting conditions(최적 절삭조건)

1. 서론

최근의 고정밀 제품생산 추세는 정밀가공 기술력에 힘입어 전 산업적으로 확산되고 있다. 특히 얇은 두께의 튜브형 제품은 그 진원도 공차가 엄격해짐에 따라 만족하는 제품을 가공하기 위한 난이도는 훨씬 높아지게 되었다. 그리고 탄소배출을 줄이기 위하여 오래전부터 수송수단의 경량화에 대한 연구성과의 하나인 강을 대신할 만금의 고강도 알루미늄의 양산능력보유를 통해 알루미늄 튜브형 제품의 수요도 크게 늘었다.

두랄루민의 한 종류인 알루미늄 70계열의 초두랄루민(Extra Super Duralumin) 소재는 알루미늄, 마그네슘, 구리, 아연 등의 합금으로서 우수한 강도를 지니는 재료로서 반복하중에 대한 우수한 피로강도를 가짐과 동시에 쾌삭성을 띄기 때문에 절

삭성이 우수하다고 볼 수 있다⁽¹⁾.

자동차의 알루미늄 휠, 군용 발사체 이를 응용한 제품으로써 경량화를 통해 각각 탄소배출 저감과 사거리 증가의 핵심적인 항목을 만족시킬 수 있다.

알루미늄의 경우 특유의 연성으로 인해 절삭가공시 가공온도가 누적되어 고온의 공구와 피삭재 사이에서 응착 및 마멸속도의 증가를 야기한다. 따라서 공작기계의 절삭가공시 피삭재에 영향을 주는 공구응착, 구성인선(Built-up edge) 등을 최소화할 수 있는 최적 가공조건의 정립이 필수적이다. 이를 위해 가공시 알루미늄 전용 공구를 사용하고 실험계획을 통해 도출된 최적 절삭조건을 적용한다면 생산성과 가공품질을 확보할 수 있다⁽²⁾.

선행연구에 의하면 대표적인 실험계획중 하나인 다구찌 방법

* 부산대학교 기계공학부, 정밀정형 및 금형가공연구소(ERC/NSDM)
주소: 609-735 부산광역시 장전동 산30 (juskim@pusan.ac.kr)

+ 부산대학교 기계공학부 대학원

++ 풍산금속(주)

+++ 한국폴리텍VII대학교

을 통해 절삭속도, 이송량, 절삭깊이, 절삭환경, 공구형상, 공구 선단반경의 6인자에 대한 주효과 기여도를 분석한 결과, 절삭 깊이, 이송량, 절삭속도의 3인자가 주요인임을 밝혀졌다⁽³⁾.

가공성 평가항목은 보통 절삭력과 를 두는데, 다구찌 방법에서 두 항목의 값이 낮을수록 가공성이 좋아지는 것이므로 손실 함수의 망소특성을 적용하였다. 절삭력과 표면거칠기는 공작 기계의 동력에서 비롯되어 발생하는 열과 응력의 소성변형 및 마찰에 큰 영향을 받으므로 절삭력과 표면거칠기의 데이터는 절삭가공 전체의 과정을 아우르는 것이라 할 수 있다⁽⁴⁾. 또한 산업현장에서의 중요한 가공성평가 요인인 경제적인 절삭가공을 위해 신뢰도를 높여야 하므로 반복실험을 통한 누적된 절삭력과 표면거칠기에 대한 절삭데이터가 필수적이다⁽⁵⁾. 선행연구에 의하면 최적 가공조건의 도출을 통해 공구의 마멸 및 손상의 원인인 절삭온도를 줄임으로써 가공성을 좋게 할 수 있다⁽⁶⁾.

따라서 본 논문에서는 이러한 평가기준과 선행연구를 참고하여 Al7075-T0 소재의 선삭가공을 통해 절삭력과 표면거칠기의 경향을 파악하고 가공성평가를 하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험계획

2.1 실험장치

선삭가공에서 사용된 공작기계는 범용선반(Namsun hi-tech, 600×2000)을 사용하였으며, 사용한 절삭공구는 국내K사의 DCGT 55°, 인선반경 0.8mm, 절입각 90°의 공구형상을 가지고 있다. 공구홀더(SCLCR 2525-M12, Korloy)를 사용하였다.

실험 계측장치로는 Fig. 1과 같이 Tool dynamometer, Charge amplifier, NI PXI(Data Aquisition system), 신호처리용 PC를 사용하였으며 표면거칠기계(Taylor Hobson, Surtronic 3+)를 사용하여 가공으로 인한 절삭열을 1분간 식힌후 가공표면을 측정하였다. 절삭가공실험에 적용된 제어인자로는 절삭깊이, 이송량, 절삭속도의 3인자에 각 3수준으로 설정하였다. Table 1 과 Table 2는 각각 피삭재 Al7075-T0 소재의 화학조성과 기계적 특성을 나타내었다.

Table 1 Chemical comparisons of Al7075-T0

Element	Cu	Si	Mg	Zn	Mn	Cr	Fe	Ti	Al
wt(%)	1.5	0.4	2.5	5.5	0.3	0.2	0.5	0.2	rest

Table 2 Mechanical properties of Al7075-T0

Mechanical Properties	Ultimate Tensile Strength	Yield Tensile Strength	Shear Strength	Modulus of Elasticity
MPa(Unit)	221	96.5	152	71,700

2.2 실험계획

반응표면법(Response Surface Method : RSM)은 실험이나 시뮬레이션으로부터 얻은 수치 값들로부터 근사화된 반응표면을 생성하고 이를 국부적으로 적용시킴으로써 최적해를 얻어 내는 방법이다. 실험결과를 바탕으로 통계적 분석 프로그램인 Minitab을 이용하여 반응표면을 생성하고, 각 인자에 대해 도출된 회귀계수를 2차 회귀방정식에 대입하여 최적의 값을 도출할 수 있다. 여기서 회귀분석을 통해 하나 이상의 예측 변수인 가공 3인자와 반응 변수인 표면거칠기 및 주분력 사이의 통계적인 관계를 설명하고 새 관측치를 예측하는 방정식을 생성한다.

식 (1)은 데이터에 적용한 2차 회귀방정식이다. 종속변수 y 는 가공실험의 평가항목인 표면거칠기와 주분력, 독립변수 x_1, x_2, x_3 는 각각 절삭깊이, 이송량, 절삭속도를 나타내며 β 는 회귀방정식의 회귀계수다.

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{11}x + \beta_{22}x_2^2 \quad (1)$$

Table 3은 Al 7075-T0 소재의 선삭가공 시 제어가능한 절삭 깊이, 이송량, 절삭속도의 3인자를 3수준으로 배치시켜 절삭조건에 따른 절삭력과 표면거칠기를 측정하고, 실험계획법의 하나인 반응표면법을 이용하여 보다 효율적으로 가공 최적조건을 도출하고자 한다. 반응표면법을 이용한 3인자 3수준 총 20 회의 절삭실험을 수행하여 표면거칠기와 주분력에 대한 최적 가공조건을 도출할 수 있다.

Fig. 1은 중심합성계획법(Face-centered Central Composite Design)에 따른 반응표면의 도식화 그림이다. 3인자 3수준의

Table 3 Cutting conditions

Factor	Level 1	Level 2	Level 3	Increment
Depth of cut (mm)	0.25	0.5	0.75	+0.25
Feed (mm/rev)	0.05	0.1	0.15	+0.05
Cutting Speed (m/min)	275	325	375	+50

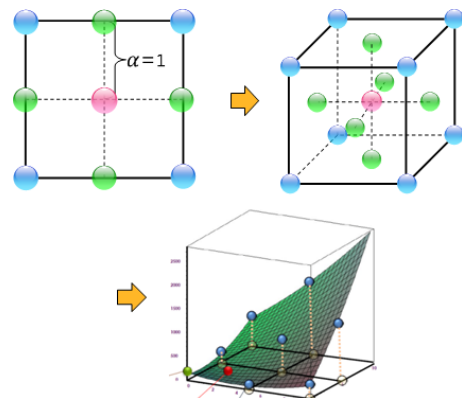


Fig. 1 Face-centered Central Composite Design

완전실험인자설계(Full Factorial Design)할 때보다 실험횟수를 줄이면서 2차 반응표면 함수를 생성하기 위해 고안된 실험계획으로 중심점과 축점을 2수준 Full Factorial Design에 추가하였다. 적은 실험횟수로 반응의 곡면적 변화를 추정할 수 있는 것이 장점이라 할 수 있다. Minitab을 이용한 반응표면 실험계획을 하여 Table 2에 제시된 실험조건에서 실시하였다.

3. 실험방법 및 실험결과

3.1 실험방법

실험데이터는 Fig. 2와 같이 표면거칠기측정계와 공구동력계를 이용하여 표면거칠기와 주분력 신호를 획득하고 분석용 PC를 통하여 분석하였다. 표면거칠기는 매 절삭실험마다 측정하였으며 컷오프 값(Cut Off)은 2.5mm로 중심선 평균 거칠기(μm)를 측정하였다. Fig. 3은 구체적으로 피삭재, 공구, 선삭가공에서 일어나는 절삭분력의 방향을 표시하였으며 Al7075-T6 소재는 몇개의 단을 나누어 절삭력 신호를 획득할 때 외란으로부터 독립적으로 획득할 수 있도록 하였다.

3.2 실험결과

Table 4는 반응표면법에 따른 20회의 실험조건과 실험결과로 얻어진 주분력과 표면거칠기의 표이다. 절삭가공 조건인 절

삭깊이, 이송량, 절삭속도와 평가인자인 주분력과 표면거칠기가 표에 기록되어 있다.

Fig. 4와 같이 절삭깊이(Depth of Cut : DOC), 이송량, 절삭속도에 따른 각각 주분력과 표면거칠기의 데이터를 얻을 수 있었다. (a)에서 보듯이 그래프 기울기를 각 인자의 주분력에 대한 영향도라고 볼 때, 절삭깊이의 영향이 이송량의 영향보다 조금 큰 가운데, 절삭속도의 영향은 미비하다. 또한 주분력은 3가지 절삭조건에 대하여 모두 비례하는 경향을 가진다. 절삭깊이의 수준에 따라서 주분력이 최소 12.1N에서 최대 33.4N까지 분포하였으며, 이송량에 따라서 최소 15.2N에서 최대 33.1N까지의 분포하였고, 절삭속도에 따라서 23N정도에 집중되어 미세한 주분력 변화만을 확인할 수 있다.

반면 (b)의 표면거칠기의 경우에는 이송량 인자가 뚜렷하게 비례하는 동시에 가장 큰 기울기를 보이며 높은 영향도를 나타내었다. 표면거칠기에 대하여 절삭깊이와 절삭속도 인자의 영향은 미비하여 비례여부를 확인하기 어렵다.

이송량의 수준에 따라 표면거칠기가 최소 0.196 μm 에서 최대 0.280 μm 까지 분포하였다. 절삭깊이와 절삭속도에 따라 표면거칠기가 0.240 μm 에서 0.250 μm 사이에 집중적으로 분포하였다. 따라서 주분력과 표면거칠기 모두를 고려했을 때 이송량

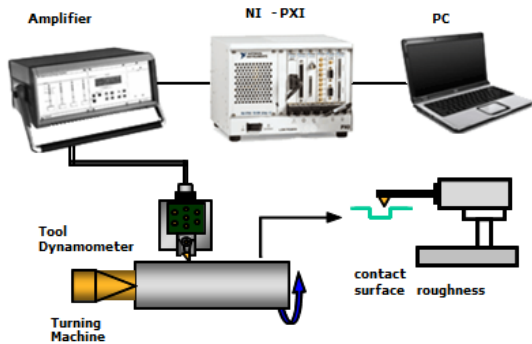


Fig. 2 Experimental setup

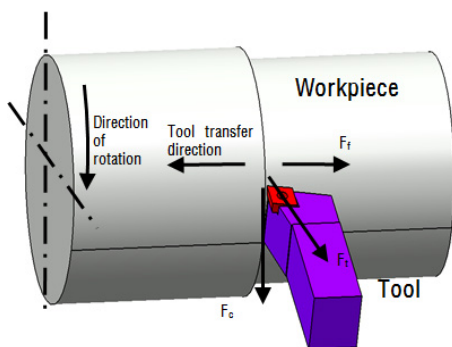


Fig. 3 Scheme of Turning Process

Table 4 Test data for turning conditions

Depth of cut (mm)	Feed (mm/rev)	Cutting speed (m/min)	Principal force (N)	Surface roughness (μm)
0.5	0.1	325	26.5	0.272
0.75	0.05	275	18.8	0.254
0.25	0.1	325	12.1	0.256
0.5	0.15	325	34.2	0.280
0.5	0.1	375	23.9	0.263
0.5	0.1	325	23.9	0.317
0.75	0.15	375	42.1	0.265
0.25	0.05	375	8.6	0.211
0.25	0.15	375	17.9	0.265
0.25	0.05	275	7.3	0.265
0.75	0.05	375	21.8	0.301
0.75	0.15	275	44.9	0.269
0.5	0.1	325	23.9	0.250
0.75	0.1	325	33.4	0.251
0.5	0.1	325	24.7	0.196
0.5	0.1	325	23.5	0.250
0.25	0.15	275	17.0	0.336
0.5	0.1	275	22.7	0.257
0.5	0.1	325	22.6	0.251
0.5	0.05	325	15.9	0.196

의 영향이 가장 크며, 두 번째로 절삭깊이이며 절삭속도는 영향도가 미비하다고 볼 수 있다.

따라서 가공조건을 탐색할 때 최적 이송량을 도출하여 가공 조건에 적용하는 것이 AI7075-T0 알루미늄 합금소재의 절삭가공 최적화에 가장 효과적일 것으로 사료된다. 그 다음으로 기계특성에 맞추어 절삭깊이와 절삭속도의 가공조건을 적당히 조합한다면 표면거칠기와 절삭력(주분력)을 모두 고려하여 효과적인 절삭가공을 할 수 있을 것이다.

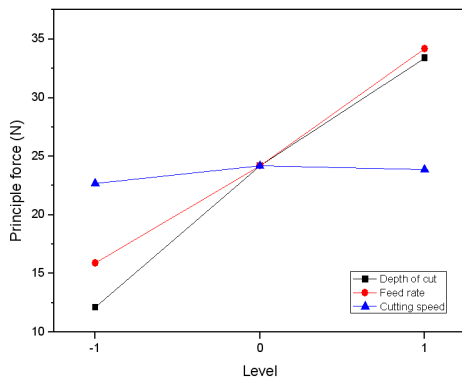
실험결과를 토대로 반응표면을 예측하였으며 그 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에서 보는바와 같이 3차원의 반응표면에 나타내었다. 표면거칠기의 경우, 절삭깊이와 절삭속도 인자에 대하여 Fig. 5의 (a)와 같은 안장형 모양의 3차원 반응표면을 이루었다. 또한 Fig. 5의 (b)는 절삭깊이와 절삭속도의 인자에 대하여 최소 변곡점의 반응표면을 도출하였으며, Fig. 5의 (c)는 이송량과 절삭속도 대하여 최대 변곡점의 반응표면을 도출하였다. 여기서 이송량의 영향이 가장 크음을 알 수 있었다.

절삭력의 경우, Fig. 6과 같이 절삭부하의 경향을 잘 반영하는 주분력의 데이터를 분석하였다.

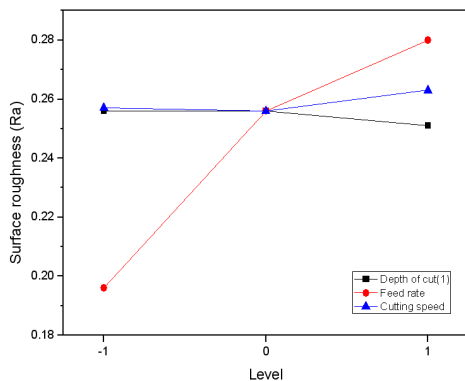
Fig. 6의 (a)는 절삭깊이와 이송량, Fig. 6의 (b)는 절삭깊이와 절삭속도, Fig. 6의 (c)는 이송량과 절삭속도에 관한 반응표면이다. 주분력의 반응표면을 분석한 결과 주분력의 경우도 표

면거칠기의 경우와 마찬가지로, AI7075-T6 소재의 선삭가공시 절삭인자 중에 이송량의 영향이 가장 크음을 알 수 있었다.

Fig. 7은 반응표면법에 의한 3인자 3수준에 대한 최적화 그림을 나타낸다. 절삭깊이 -1, 이송량 0.1515, 절삭속도 -1.0에 해당하는 수준으로써 반응표면법에 따르는 가공조건은 절삭깊이 0.25mm, 이송량 0.05mm/rev, 절삭속도 322.5m/min이 도출되었다. 이는 절삭깊이와 절삭속도의 최소화하면서 적절한 이송량으로 가공할 때 만족할 만한 표면거칠기와 주분력을 얻을 수 있음을 의미한다. Table 5는 Minitab 프로그램을 통한 회귀방정식의 회귀계수들이며 식 (2)는 절삭실험의 회귀방정

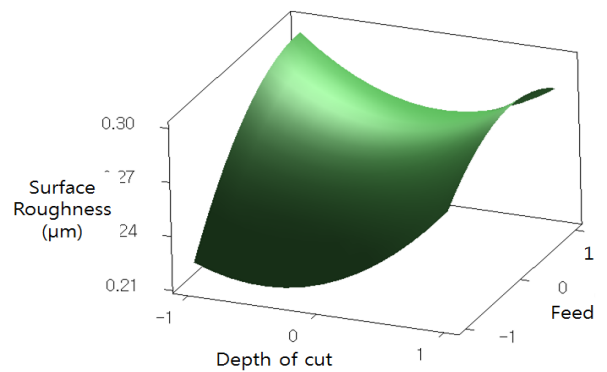


(a) Principle force

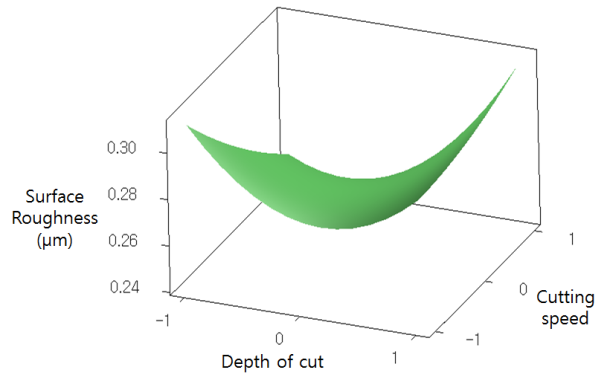


(b) Surface roughness

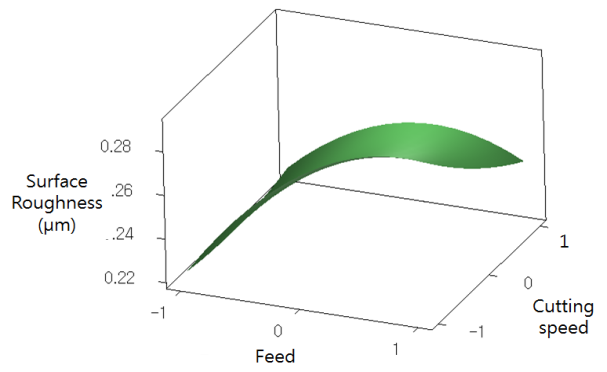
Fig. 4 Results of cutting data



(a) Depth of cut and feed

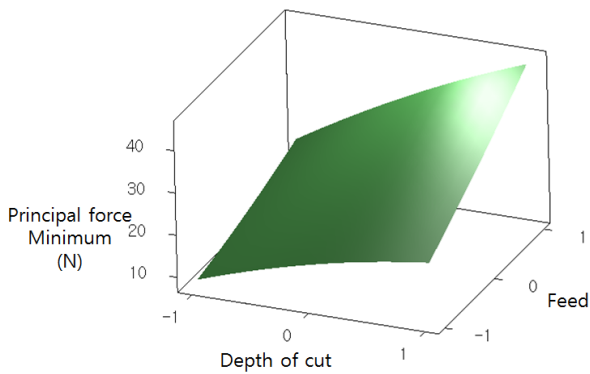


(b) Depth of cut and cutting speed

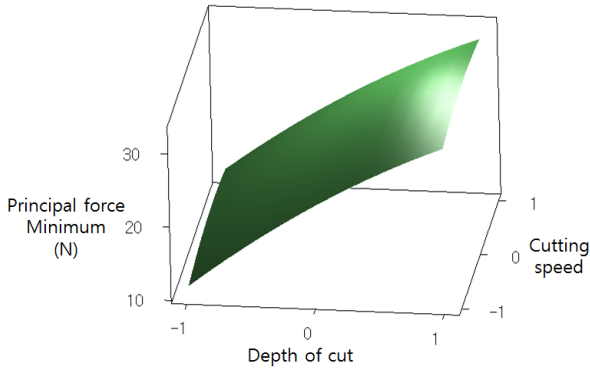


(c) Feed and cutting speed

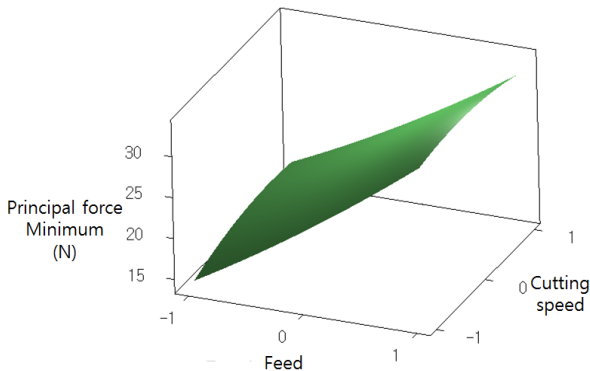
Fig. 5 RSM of surface roughness



(a) Depth of cut and feed



(b) Depth of cut and cutting speed



(c) Feed and cutting speed

Fig. 6 RSM of principal force

식이다. 회귀계수의 양, 음의 부호는 인자간 관계에서의 방향을 나타낸다. 따라서 본 절삭력 및 표면거칠기의 데이터를 3차원 진원도 측정결과와 비교하여 궁극적으로 고정밀 튜브형상 제품을 생산할 수 있는 최적 절삭조건을 연구하여 도출할 수 있을 것이다.

$$\hat{y} = 24.2503 + 9.8121x_1 + 8.3814x_2 - 0.3594x_3 - 1.60761x_1^2 + 0.692891x_2^2 - 1.02661x_3^2 \quad (2)$$

Fig. 7 Graph of optimization

Optimum	Depth of cut(mm)	Feed(mm/rev)	Cutting speed(m/min)
D	1.0	1.0	1.0
High	[-1.0]	[0.1515]	[-1.0]
Low	-1.0	-1.0	-1.0

Total satisfaction	0.72172		
Principal cutting Force-Minimum	$y = 12.0896$		
	$d = 0.82276$		
Specific cutting Force-Minimum	$y = 446.7629$		
	$d = 0.63309$		

Table 5 Regression coefficient according to optimization

Term	Coefficient
Constant	24.2503
Depth of cut(mm)	9.8121
Feed(mm/rev)	8.3814
Cutting speed(m/min)	0.3594
Depth of cut×Depth of cut(mm ²)	-1.60761
Feed×Feed((mm/rev) ²)	0.692891
Cutting speed×Cutting speed(m/min ²)	-1.02661

4. 결론

본 논문에서는 반응표면법을 적용하여 Al7075-T0 소재의 선삭가공을 통해 표면거칠기와 주분력을 고려할 때 최적 가공 조건을 도출하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 표면거칠기와 절삭력 모두를 고려하여 반응표면법의 회귀 방정식을 적용한 결과, Al7075 소재의 선삭가공에서 이송량이 가장 큰 절삭인자로 규명되었다.
- (2) 비교적 고강도를 갖는 쾌삭소재인 알루미늄 70 계열의 선삭가공에서는 절삭깊이와 이송량을 가능한 작게 설정하면서 320mm/min 정도의 절삭속도를 유지한다면 표면거칠기와 절삭력 면에서 만족한 결과를 얻을 수 있다.
- (3) 반응표면법에 의해 도출된 최적가공 조건은 절삭깊이 0.25mm, 이송량 0.05mm/rev, 절삭속도 322.5m/min이며 이 때의 주분력은 8.2N, 표면거칠기는 0.23μm이다.

후 기

이 논문은 방위사업청의 2012년도 민군겸용기술개발(09-DU-MP-02) 지원에 의하여 연구되었습니다.

References

- (1) Yu, M. H., Yu, C. H., Hong, D. P., Kim, C. S. and Kim, Y. J., 2010, "Study on the Mechanical and Surface Properties of Friction Welded Al Wlloy 6061-T6 and 7075-T6," *Korean society of Machine Tool Engineers 2010 Autumn Conference*, pp. 389~393.
- (2) Lee, H. I., Han, Y. S., Kim, D. H., and Kim, W. T., 2005, *Comprehension and Apply of Advanced Technique on Aluminum*, KMJ News.
- (3) Poongsan, 2012, *Development of a Large Aluminum Tubes using Cryogenic Heat*, Poongsan corporation.
- (4) Choi, T. K., Kim, J. S., Park, J. H., and Lim, H. J., 2009, "The Machinability Estimation Depending on Cutting Condition in Al6061-T6 Turning Operations," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 18, No. 6, pp. 675~680.
- (5) 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.
- (6) Vincent, D., Shreyes, N. M., and Christophe, L., 2004, "Modeling and Verification of Cutting Tool Temperatures in Rotary Tool Turning of Hardened Steel," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, No. 14, pp. 1463~1470.