

Liquid metal을 이용한 고속 양면 가공 및 라틴 방격법에 의한 최적 가공 조건 선정

임 표*, 이희관+, 양균의++

High Speed Machining of the thin surface parts using liquid metal and selection of machining condition by Latin Square Method

Pyo Lim*, Hi Koan Lee⁺, Gyun Eui Yang⁺⁺

Abstract

The rapid machining of prototypes plays an important role in product process. Rapid Prototyping(RP) is the widespread technology to produce prototype. But, it have many problems such as shrinkage, deformation and formation occurred by hardening of resin and stair shaping. On the contrary, high speed machining(HSM) technology has many advantages such as good quality, low cost and rapid machining time. Moreover, it is possible to use the material of original product.

This paper presents manufacture of trial product by HSM and optimization of machining condition for high productivity in the view of manufacturing time and average error. For example, propeller is machined by the surface machining of thin surface parts. Experiments are designed of machining conditions by Latin Square method and machining condition is optimized and selected by ANOVA

Key Words : High Speed Machining(고속 가공), Optimization(최적화), Latin Square Method(라틴 방격법), ANOVA(분산 분석)

1. 서론

소비자들의 다양한 욕구 변화와 이에 따른 제품의 life

cycle이 짧아짐에 따라 제품의 개발 시간 단축 및 다품종 소량 생산에 대한 필요성의 증가는 생산 방식 및 공정에 대한 근본적인 변화를 요구하고 있다.

* 전북대학교 대학원 기계공학과 (satanr@dreamwiz.com)

주소: 전북 전주시 덕진구 덕진동1가 전북대학교 공과대학 기계공학과 cad/cam lab

+ 사) 전북대학교 자동차 부품·금형 기술 혁신 센터

++ 전북대학교 기계항공시스템공학과

특히 생산에 앞서 제품의 평가 및 문제점을 찾아내는 공정은 제품을 개발하는데 있어서 매우 큰 비중을 차지하며, 이에 드는 비용과 시간의 단축은 전체 공정의 생산성 향상에 크게 기여하게 된다. 지금까지는 RP(Rapid Prototype) 기술이 적용되어 많은 효과를 거두고 있으며, 사용재료와 적층 방식에 따른 여러 공정의 개발 등 많은 연구가 이루어지고 있다. 하지만 사용된 수지가 경화됨에 따라 발생하는 수축 및 변형과 적층 작업으로 인한 자유 곡면 생성시 계단형상의 발생 등으로 정밀 시작품 제작에 어려움이 있고, 값비싼 장비와 재료비 또한 문제점으로 작용한다.

이에 비하여 산업 전반에 널리 사용되고 있는 고속 가공 기술은 정밀 제작이 가능하며, 월등한 생산성이 장점이다. 물론, 제품 형상의 특징에 따른 제약이 존재하지만, 실제 생산하고자 하는 제품과 같은 재질의 시작품 제작이 가능하고 다품종 소량 생산 체제로의 적용이 가능하다.

본 논문에서는 고속 양면 가공을 통하여 주로 다축 가공에 의해 생산되는 프로펠러의 시작품을 제작하고자 한다. 양면 가공시 언더컷(under cut)이 발생하지 않는 간단한 5 날 형상의 프로펠러를 채택하였다. 효율적인 가공을 수행하기 위하여, 형상을 상면과 하면으로 분할 공정으로 양면 가공을 수행하였다. 이렇게 생산된 시작품을 RP와 비교하였다. 또한 고정도강을 원재료로 하여 가공 변수에 따른 가공 시간 및 평균 오차를 측정하여 생산성을 비교하였다.

변수들에 따라 데이터들의 중복과 쓸림을 방지하기 위하여 직교 배열에 의한 실험 계획법 중에서 일부 실시법 중의 하나인 라틴 방격법이 이용되었으며, 분산분석(ANOVA)를 통하여 인자로 선정된 스핀들(spindle), 피드(feed), 경로 간격(pass interval)에 대한 요인의 변동을 분석하여 특성치인 가공 시간 및 평균 오차에 영향을 미치는 효과를 파악하고, 최적 조건을 선정하고자 하였다.

2. 라틴 방격법

인자에 대한 각 수준의 모든 조합에 대하여 실험을 행하는 방법을 요인 배치법이라고 한다. 하지만 이와 같은 요인 배치법은 인자와 수준수가 늘어남에 따라 실험의 수가 기하급수적으로 증가하기 때문에 비효율적일 수 있다. 이에 불필요한 교호 작용이나 고차의 교호작용을 구하지 않고 각 인자의 조합 중에서 일부만을 선택하여 실험을 실시하는 데 이를 일부 실시법이라고 한다.

이러한 일부 실시법 중에서 k개의 숫자나 글자를 행과 열

에 하나씩 배치하여 총행으로 k개씩의 숫자 또는 글자가 4각형이 되도록 배치하는 실험 계획법을 k×k 라틴 방격법이라고 한다. 라틴 방격(Latin Square)은 3인자 실험에 사용되며, 각 인자의 수준수인 k가 반드시 동일하여야만 한다. Table 1은 인자 A, B, C에서 3수준(k=3)인 라틴 방격법의 배치를 보여주고 있다.

Table 1 Array of 3×3 Latin Square

	A_1	A_2	A_3
B_1	C_1	C_2	C_3
B_2	C_2	C_3	C_1
B_3	C_3	C_1	C_2

이를 이용하면, Table 2와 같이 9번의 랜덤하게 수행되는 조건으로 실험을 행할 수 있다. 각 조건에서 행한 3회의 실험에 A, B, C에 대한 각 수준이 모두 1회씩 균등하게 들어가도록 균형이 잡혀 있어 적은 횟수로 실험을 가능하게 한다. 이에 완전 실험을 실시하는 요인 배치법의 1/3의 실험만으로 분석이 가능하였으며, 고속 가공 수행시 특성치에 대한 스핀들, 피드, 경로간격의 각 인자간에 교호 작용이 작용하지 않는다고 가정하고 주효과만을 파악하고자 하였다.

Table 2 Experimental design for Latin Square

Experiments No	Experimental condition
1	$A_1 B_1 C_1$
2	$A_1 B_2 C_2$
3	$A_1 B_3 C_3$
4	$A_2 B_1 C_2$
5	$A_2 B_2 C_3$
6	$A_2 B_3 C_1$
7	$A_3 B_1 C_3$
8	$A_3 B_2 C_1$
9	$A_3 B_3 C_2$

3. 고속 양면 가공

3.1 모델 및 가공 전략

설계 데이터가 존재하지 않는 프로펠러를 설계하기 위한 방법으로 비접촉식 레이저 스캐너를 이용한 점 데이터 획득 방식을 채택하였다. 단면 곡선은 형상 표현이 우수하고 국부적인 수정이 편리한 B-spline 곡선이 이용되었다. 윗면과

아랫면 생성 후 분리된 날개의 윗면과 아래면은 C_2 연속성을 갖도록 블렌드(blend) 곡면을 생성하여 연결하였고, 바깥면은 프로펠러 반경의 원통을 수정 후 생성하였다.

모델 생성 및 관리의 편의성을 위하여 최종 블레이드 형상은 CATIA V5를 이용하여 솔리드로 변환하였으며, 허브 축을 중심으로 회전하여 최종적인 프로펠러 형상을 완성하였다. Fig. 1은 단일 블레이드 형상과 이를 회전하여 생성한 최종 블레이드 형상 모델을 보인다.

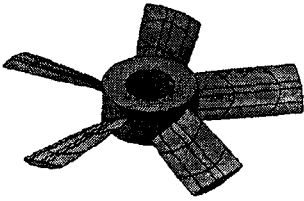


Fig. 1 Propeller model of 5 blades

3축에 의한 프로펠러 가공을 수행할 경우에는 Fig. 2와 같은 언더컷이 발생하는데, 상·하면의 가공 경로를 생성하기 위해서 형상의 분할이 필요하며, 블레이드의 위와 아래면을 나누는 parting surface의 설정은 중요한 작업이다.

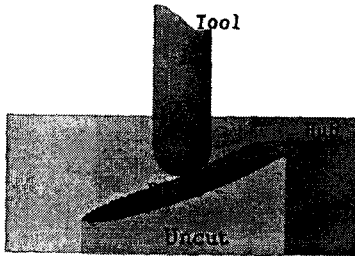


Fig. 2 Uncut in machining of blade

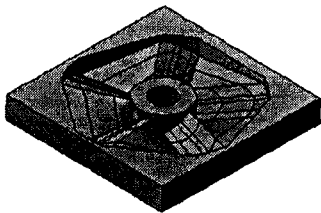


Fig. 3 Definition of parting surfaces using upper surfaces and blend surfaces of blade

Fig. 3은 블레이드 면의 boundary 곡선을 이용하여 parting curve의 정의 및 블레이드 상면을 가공하기 위한 가상의 parting surface로 정의한 것이다.

3.2 liquid metal setup 및 가공

고속 양면 가공을 수행하기 위하여 사용된 장비는 수직형 M/C로 SIRIUS-2형이다. 이 장비에 기어형의 고속 증속기를 장착하여 주축 회전수를 최고 50,000rpm까지 증속시켰으며, Fig. 4는 이를 보여주고 있다.

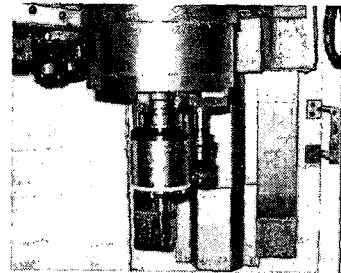


Fig. 4 VMC with spindle speeder

상면 가공을 수행하고 형상을 고정하기 위해 사용되는 충전재는 weiguss LM 70이며, 화학적 성분은 Table 3과 같다. 이 재료는 금속재이기 때문에 고형화가 되면 원재료의 고정성이 뛰어나며, 녹는점이 70°C 안팎인 저융점 금속으로 녹이기 쉽기 때문에, 하면 가공을 수행한 후에 뜨거운 물에 넣어 시작품과 충전재를 쉽게 분리할 수 있어 회수율이 높고 재사용이 가능하다는 장점이 있다.

Table 3 Chemical composition of weiguss LM 70

Chemical composition	Bi/Pb/Sn/Cd
Melting point	70°C
Specific gravity	9.95

가공 경로는 상면과 하면에서 각각 황삭, 중삭, 정삭으로 생성하였고, 하면 가공 후 블레이드 면의 boundary 곡선을 따라 마무리 잔삭을 수행하였다. 황삭과 중삭 가공은 parting surface을 고려할 경우에 자유 곡면 가공의 특징상 가공 시간이 증가하므로 블레이드의 상면을 check surface로 설정하여 2.5D 가공을 수행하였다. 정삭 가공은 블레이드 특징을 고려하여 isoparametric 방식을 채택하였다.

다축 가공을 통하여 블레이드 가공을 수행할 경우에는 블

레이드 형상의 얇은 두께로 절삭력에 의한 휨이나 변형 등의 현상이 발생하여 오차에 인한 치수 정밀도에 문제가 발생할 수 있기 때문에 이를 고려하여 가공 경로를 생성하여야 한다. 양면 가공에서는 상면 가공 후 충전재로 고정하여 이를 해결하였다.

양면 가공의 가장 큰 문제는 잘못된 세팅에 의한 형상의 어긋남이다. 오차는 xy 평면 오차와 z축 오차로 나눌 수 있는데, 전자의 경우는 Fig. 5와 같이 각 2개의 고정점(fixing point)을 설정하여 셋업 변경시 오차를 줄일 수 있으며, 후자의 경우는 터치볼 센서를 이용하여 최소화한다. Fig. 6은 제작된 $\Phi 100$ 인 프로펠러의 최종 형상이다.

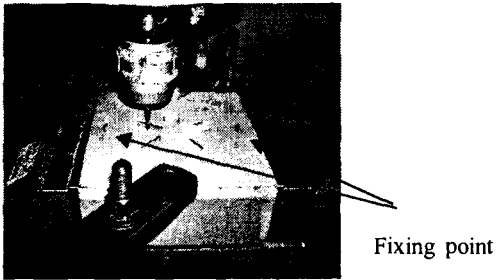


Fig. 5 Set-up method with liquid metal

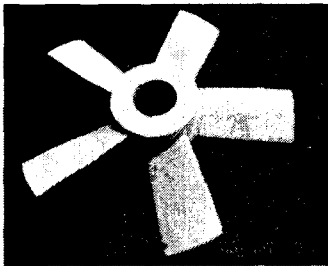


Fig. 6 a finished propeller prototype by HSM

4. 생산성 분석

NAK 80을 피삭재로 시작품을 제작하였으며, 생산성을 비교하기 위해 가공 시간과 평균오차를 고려하였다. 본 실험에서 사용된 공구는 황삭과 정삭에서 $\Phi 5$ 과 $\Phi 3$ 이다. 황삭은 가공 조건이 고정되었으며, Table 4는 특성치로 선정된 총 가공 시간 및 평균 오차에 영향을 끼치는 인자라고 생각되는 정삭 조건인 스피들, 피드, 경로간격을 요인으로 선정

하여 각 수준을 결정한 것이다.

Table 4 Factors and levels for finishing process

Factor & Sign	Spindle (rpm)	Feed (m/min)	Pass interval (mm)
Level	A	B	C
1	16,000	200	0.2
2	24,000	300	0.4
3	32,000	400	0.6

완전한 실험을 실시하기 위해서는 총 27번의 실험이 필요하지만 3×3 라틴 방격법을 이용하여 9번의 실험만으로 특성치인 총가공 시간 및 평균 오차를 파악하였고, 각 인자의 영향력을 비교하였다. 가공 시간에 영향을 끼치는 인자와 최적의 가공 조건을 파악하였다. Table 5는 각 실험 조건에서 실시된 시작품의 제작 시간을 보여준다.

Table 5 Manufacturing time array by Latin Square

Experiments No	Machining condition			total time (min)
	A	B	C	
1	16,000	200	0.2	244.5
2	16,000	300	0.4	142.3
3	16,000	400	0.6	118.5
4	24,000	200	0.4	168.1
5	24,000	300	0.6	127.6
6	24,000	400	0.2	177.6
7	32,000	200	0.6	146.0
8	32,000	300	0.2	193.3
9	32,000	400	0.4	129.5

가공 시간에 영향을 끼치는 요인을 분석해 보고자 Table 6과 같이 분산 분석(Analysis of Variance)를 실시하였다.

Table 6 Analysis of variance table for total time

	S	Φ	V	F	P
A	48.5	2	24.3	0.98	0.505
B	2207.5	2	1103.8	44.61	0.022
C	7532.9	2	3766.4	152.22	0.007
Error	49.5	2	24.7		
Total	9838.4	8			

귀무가설을 $H_0: \sigma_{A,B,C}^2=0$ 로 A, B, C의 분산이 0

이라고 가정하였고, 대립 가설은 $H_1: \sigma^2 > 0$ 로 설정하였다. 이 의미는 $F_0 = \frac{V_{A,B,C}}{V_E} > F(\phi, \phi_E; \alpha)$

이면, 귀무가설이 기각되어 유의수준 α 에서 분산이 0이 아니며, 이는 각 인자들이 특성치에 다른 변동을 가진다는 것을 의미한다. 이를 판단하기 위한 방법으로 총 제작 시간에 대한 유의성을 검증하고자 F-검정을 실시하였다.

본 논문에서는 귀무가설의 유의성을 쉽게 판단하기 위하여 F-분포표의 면적비로 표현되는 P값을 이용하였다. 유의수준은 95%로 설정하여 각 요인을 판단하면, 스피들(A)은 귀무가설을 기각시키지 못하므로 유의하다고 볼 수 없지만, 피드(B)와 경로간격(C)은 유의하다고 판단되어 가공 시간에 영향을 끼친다고 볼 수 있다. 특히 경로간격의 경우는 99% 유효수준에 만족하여 크게 영향을 끼친다고 생각된다.

Fig. 7은 고속 양면 가공에 의해 시작품 제작시 가공 시간에 대한 각 요인의 수준별 주효과를 나타낸 그래프이다.

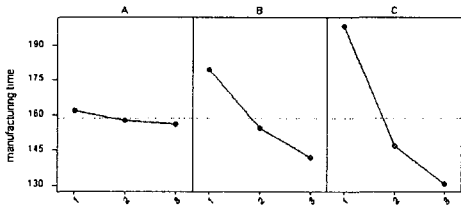


Fig. 7 Main effect of factors for total time

스피들(A)은 유의하지 않다는 판단처럼, 수준별 차이가 존재하지 않으며, 피드(B)와 경로간격(C)은 모두 3수준(B=400m/min, C=0.6mm)에서 가공 시간이 가장 적게 소요된다는 것을 보여준다.

Table 7 Average error array by Latin Square

Experiments No	Average error
1	0.05528
2	0.08125
3	0.09330
4	0.07009
5	0.08215
6	0.06074
7	0.07981
8	0.05204
9	0.07913

평균 오차 비교는 설계 데이터와 측정 데이터를 비교하는 방식으로 수행되었다. Table 7은 라틴 방격법에 의하여 평균 오차를 측정된 결과를 보여준다. 결과값인 평균 오차는 반복 측정하여 분석된 값들 중에서 이상값을 제거하고 나머지 값들의 평균값들을 취한 값들이다.

Fig. 8과 9는 RP에 의하여 생산된 시작품과 고속 양면 가공에 의해 생산된 시작품의 오차를 분석한 것이다.

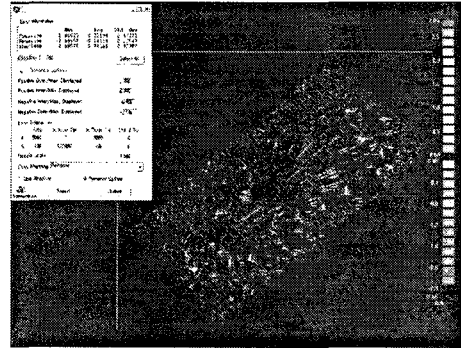


Fig. 9 Error analysis on surface by RP

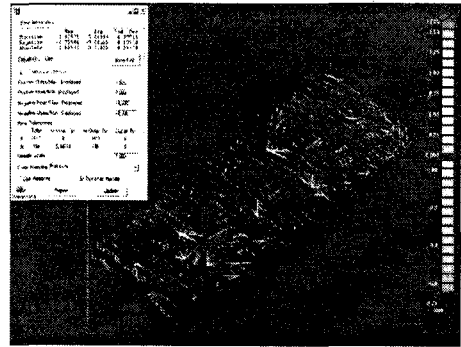


Fig. 8 Error analysis on surface by HSM

Table 8은 평균 오차에 영향을 미치는 요인을 알아보기 위해 분산 분석을 한 결과이다.

Table 8 Analysis of variance table for average error

	S	ϕ	V	F	P
A	0.0000715	2	0.0000357	9.28	0.097
B	0.0001337	2	0.0000668	17.36	0.054
C	0.0013459	2	0.0006730	174.77	0.006
Error	0.0000077	2	0.0000039		
Total	0.0015588	8			

유의 수준 95%에서 경로간격(C)은 귀무가설을 기각시켜 유의하다고 판단되며, 스피들(A)과 피드(B)는 95%에는 유의하지 않지만 90% 유의 수준에는 유의하다고 판단된다.

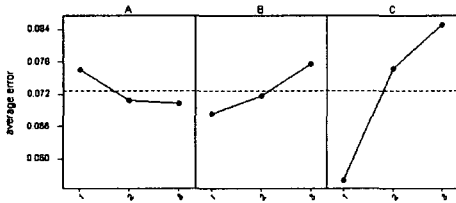


Fig. 10 Main effect plot of factors for average error

Fig. 10은 고속 양면 가공에 의한 시작품 제작 시 평균 오차에 대한 각 요인의 수준별 주효과를 나타낸 그래프이다. 스피들(A)은 2, 3수준(24000, 32000 rpm)이 비슷하게 영향을 끼치고 있으며, 피드(B)와 경로간격(C)은 모두 1수준(B=200m/min, C=0.2mm)에서 평균 오차가 가장 적다는 것을 보여주고 있다.

7. 결론

본 연구에서는 시작품을 제작하기 위하여 고속 양면 가공에 의한 시작품 제작 방법을 제시하였다. 효율적인 가공을 수행하기 위해 상면과 하면을 분할하였고, 저용점 금속을 사용하여 원재료를 고정시켰다. 고속 가공 조건을 선정하기 위해 라틴 방격을 이용한 실험 계획법을 사용하였다. 또한 가공 시간 및 평균오차 측면에서 가공 조건을 평가하고자 분산 분석을 통하여 각 인자의 주효과와 최적의 가공 조건을 선정하였다. 이에 다음과 같은 결과를 얻었다.

① 가공 시간은 피드와 경로간격에 가장 큰 영향을 받으며 400m/min와 0.6mm에서 가공 시간이 가장 적게 소요됨을 알 수 있었다.

② 평균 오차에 가장 많은 영향을 끼치는 요인은 경로간격, 피드, 스피들 순이었으며, 경로 간격은 특히 큰 영향을 끼쳤는데, 0.2mm에서 가장 오차가 적었다. 스피들은 24000 rpm과 32000rpm에서 오차에 끼치는 영향력이 거의 비슷하였으며, 피드는 200m/min에서 가장 적었다.

참고 문헌

- (1) K. Y. Lim, M. S. Yil, "Recent trends in development of rapid prototyping technology", Journal of Korean Society of Precision Engineering, Vol.16, No.2, pp96-102, 1996.
- (2) P. Lan, S. Chou, L. Chen and D. Gemmill, 1997, "Determination of Fabrication Orientation for Rapid Prototyping with Stereolithography Apparatus", Computer-Aided Design, Vol.29, No.1, pp.53-62
- (3) H. Schut, "High Speed Milling of Dies and Mould-Cutting Conditions and Technology", CIRP, Vol. 44, 1995.
- (4) R.C. Dewes and D.K. AspinWall "A review of ultra high speed milling of hardened steels", Materials Processing Technology, Vol. 69, pp. 1-17, 1997
- (5) D.W. Lee, Y.H. Jeong, M.C. Kang, K.Y. Lee, J.S. Kim, K.G. Kim, S.W. Kim, "Advanced Machining Technology for Die Manufacturing I" Journal of Korean Society of Precision Engineering, Vol. 17, No. 4, pp. 48-68, 2000.
- (6) P. Lim, D. K. Jang, H. K. Lee, G. E. Yang, "High speed machining of cavity pattern in prehardened mold using the small size tool", Journal of Korean Society of Precision Engineering, Vol. 21, No.1, pp. 133-139, 2004.
- (7) B. S. Shin, D. Y. Yang, D. S. Choi, T. J. Je, E. S. Lee, K. H. Whang, J. H. Lee, "Rapid Manufacturing of Trial Molds and Prototypes by High Speed Machining" Journal of the KSPE, Vol. 18, No. 12, pp. 124-129, 2001.
- (8) B. S. Shin, D. Y. Yang, D. S. Choi, E. S. Lee, T. J. Je, K. H. Whang, "Development of Automatic Filling using Low-Melting point Metal for Rapid Manufacturing with Machining Process" Journal of the KSPE, Vol. 19, No. 3, pp. 88-94, 2002.
- (9) J. Y. Jung, "Parametric Design and CNC Tool path Generation of a Propeller Blade" Journal of the KSPE, Vol. 15, No. 8, pp. 46-59, 1998.