

밀링 가공 공정에서 복합실험계획법을 이용한 최적 절삭조건 결정

김용선*, 권원태⁺

(논문접수일 2010. 09. 02, 심사완료일 2011. 06. 03)

Determination of Optimal Cutting Conditions in Milling Process using Multiple Design of Experiments Technique

Yong-Sun Kim*, Won-Tae Kwon⁺

Abstract

In the present study, Taguchi method is used to determine the rough region first, followed by RSM technique to determine the exact optimum value during milling on a machining center. A region reducing algorithm is applied to narrow down the region of the Taguchi method for RSM. The result from the Taguchi method is fed to train the artificial neural network (ANN), whose optimum value is used to drive the region reducing algorithm. The proposed algorithm is tested under different cutting condition and results show that the introduced algorithm works well during milling process. It is also shown that theoretically obtained optimal cutting condition is very close to experimentally obtained result.

Key Words : Design of experiments(실험계획법), Taguchi method(다구찌방법), Response surface method(반응표면법), Central Composite Designs(CCD, 중심복합법), Neural Network(신경회로망)

1. 서론

밀링공정에서 각종 금속소재와 밀링가공용 인서트의 조합의 경우의 수는 증가하고 있다. 생산효율을 향상시키고, 공구의 지출비용을 줄이기 위해서 생산자는 가공재료와 절삭공구에 따라 절삭환경의 최적조건을 얻기를 원한다. 하지만 얻어진 절삭 변수들의 정확한 최적조건을 얻기 위해서는 더 많은 실험이 필요하다⁽¹⁾. 기존 연구 대부분이 영향을 끼치는 주요 인자를 파악하기 위한 실험을 할 때 시간과 수고를 줄이고자 다구찌 방법과 반응표면 법 같은 실험계획법을 사용하여 비교 분석하였다^(2,3). 하지만, 실험방법마다 장단점이 있기에 한 가지 방법만으로 정확한 조건에 도달하기 위해서는 어려움이 있다. 다구찌 방법은

실험 횟수의 최소화와 인자들의 실험 구간을 넓게 선정할 수 있어 인자들이 끼치는 정도를 대략적으로 파악할 수 있지만 정확한 절삭조건을 구하기 어렵다⁽⁴⁾. 반응표면 법은 각 인자들의 교호작용까지 고려하여 정확한 최적조건을 선정할 수 있지만, 인자들의 실험구간 설정에 어려움이 있다. 각 실험법의 단점을 보완하고자 최근 논문에 선삭공정에서 다구찌 방법, 뉴럴 네트워크, 반응표면 법을 이용한 복합 실험계획법이 사용되었다⁽⁵⁾. 하지만 단속공정인 밀링공정에서 복합실험법의 작동여부는 실험되지 않았다.

이 연구에서는 밀링공정에서 복합실험법을 이용하여 최적 절삭조건을 빠르게 구하는 방법을 제안하고 실험으로 증명하였다. 가공재료에 따른 절삭공구의 최적절삭조건을 구하기 위해

⁺ 서울시립대학교 기계정보공학과 대학원

^{*} 교신저자, 서울시립대학교 기계정보공학과 (kwon@uos.ac.kr)

주소: 130-743 서울시 동대문구 전농동 90

다구찌 방법, 뉴럴 네트워크, 반응표면 법을 차례로 사용하여 서로의 단점을 보완하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 밀링공정에서 복합 실험계획법을 적용하였다. 밀링공정 특성을 고려하여 절삭속도, 이송량, 절입량을 인자 요인으로 선정하였으며 공구 마멸량이 일정한 수준에 도달 할 동안에 최대 절삭부율을 얻기 위한 조건을 최적절삭조건으로 정하였다.

복합 실험계획법에 있어서 먼저 다구찌 방법을 이용하여 넓은 범위의 초기 인자 구간에서 대략적인 최적조건을 선택하고, 다구찌 방법에 사용된 초기 인자 구간과 다구찌 방법의 실험을 통해서 나온 결과 값을 이용하여 뉴럴 네트워크를 훈련시켰다. 다구찌 방법과 뉴럴 네트워크에서 각각 얻어진 최적 값들을 기초로, 실제 최적 값이 존재할 수 있는 범위를 결정하였다. 이렇게 축소된 범위에 실제로 최적 값이 존재하는지의 여부는 반응표면 법을 이용하여 증명하였고, 반응표면 법에서 얻어진 최적 값의 정확도 여부는 실험을 통해 확인하였다.

2.1 실험장치

본 연구에서 사용한 공작기계는 머시닝센터(DAEWOO ACE-V500)이고, 절삭공구는 SNGN120408 규격의 P20(WC- CO insert, TaeguTec)이며, 절삭 재료는 SM45C(HB200)이다. 정면밀링(밀링공구:WSN44R) 가공을 건식 절삭으로 행하였고, 광학현미경(Bestec vision, Xi-Cam)으로 공구의 플랭크 마멸량을 측정하였으며, 플랭크 마멸량이 300 μ m에 도달했을 때 공구수명이 끝난 것으로 판정하였다. 실험에 사용된 머시닝 센터의 모습이 Fig. 1에 보여졌다.

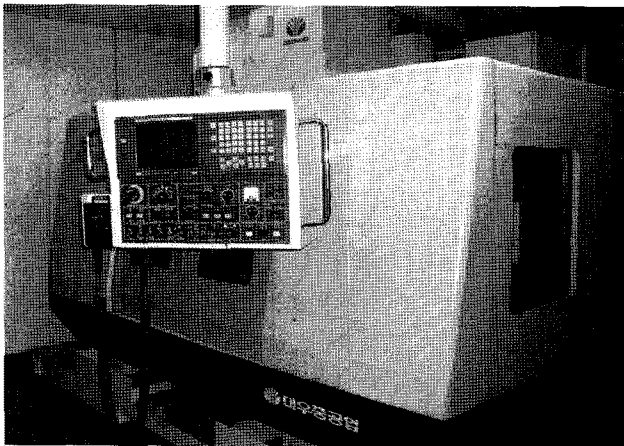


Fig. 1 Machining center used for the experiment (DAEWOO ACE-V500)

Table 1 $L_9(3^4)$ orthogonal array

No	S (m/min)	F (mm/rev)	D (mm)
1	A	A	A
2	A	B	B
3	A	C	C
4	B	A	B
5	B	B	C
6	B	C	A
7	C	A	C
8	C	B	A
9	C	C	B

Table 2 Cutting condition for Taguchi method

	A	B	C
S (m/min)	300	500	700
F (mm/rev)	0.10	0.20	0.30
D (mm)	0.30	0.40	0.50

2.2 다구찌 방법을 이용한 초기 가공조건 결정

다구찌 방법은 실험 횟수의 최소화와 인자들의 실험 구간을 넓게 선정할 수 있어 인자들이 결과에 미치는 영향을 파악하는데 적절한 방법이다. 공구수명을 최대화하는 절삭조건을 구할 경우 다구찌 방법은 근사최적조건을 구할 수 있지만 한번의 실험으로 정확한 값을 구하기는 어렵다.

그럼에도 불구하고 다구찌 방법을 사용하는 이유는 최소 실험으로 최적조건을 포함한 넓은 범위의 인자 구간을 선정하기 위함이다. 밀링공정의 특성을 고려하여 스피indle 회전속도, 이송속도, 절입량을 인자 요인으로 선정하였고 고의적으로 과도하게 넓은 간격을 갖도록 결정하였다. 초기절삭조건은 Table 1에 나와 있는 다구찌 방법의 $L_9(3^4)$ 직교배열을 적용하였는데 그 조건이 Table 2에 주어졌다.

2.3 뉴럴 네트워크를 이용한 최적절삭조건 범위 축소

뉴럴 네트워크는 입력과 출력은 알고 있으나 그 내부 시스템을 모르거나 불확실한 경우의 모델링에 적합하므로 절삭 가공의 모델링에도 많이 사용되었다.

본 연구에서는 다구찌 방법에 사용된 절삭조건과 결과를 이용하여 뉴럴 네트워크를 트레이닝 시켜서 절삭공정을 모델링하였다. 다구찌 방법과 뉴럴 네트워크 방법으로 얻어진 최적 값들의 차이가 크면 다구찌 방법에서 얻어진 최적 값과 실제 최적 값의 차이가 클 가능성이 높으므로, 좀 더 정밀한 최적 값을 구하기 위한 범위를 결정할 때 범위를 많이 축소하지 않고, 차이가 작으면 범위를 많이 축소하여 최적 값을 찾는 것이 이 방법의 기본 아이디어이다. 뉴럴 네트워크를 사용하면 최적

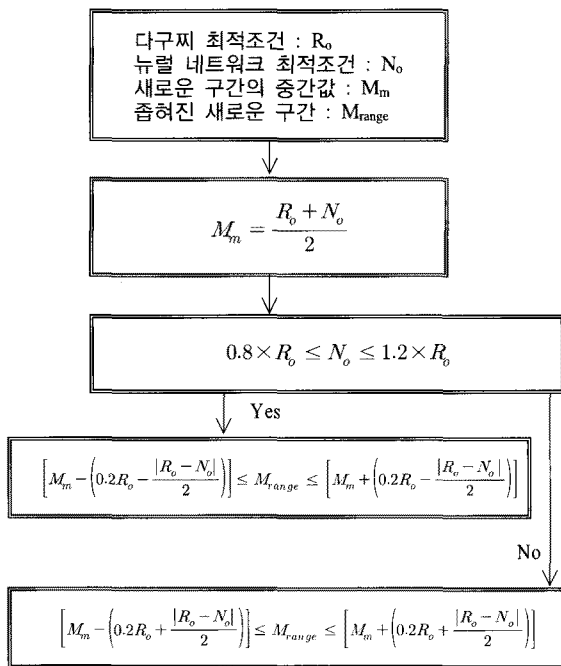


Fig. 2 Flow chart to determine the reduced optimal range

절삭조건의 범위를 축소하기 위한 추가적인 실험을 줄일 수 있다. 뉴럴 네트워크는 상용프로그램인 Matlab에 내장된 함수를 사용하였으며 은닉층 1개, 은닉 뉴런 6개, 모멘트 0.6, 학습률 0.3으로 하여 100,000회 학습시켰다. 다구찌 방법으로 얻어진 최적조건과 뉴럴 네트워크로 얻어진 최적조건으로 인자의 구간을 축소하는 알고리즘이 Fig. 2에 주어졌다.

2.4 반응표면 법에 의한 정밀 최적절삭 조건

반응표면(response surface)은 반응변수와 독립변수와의 함수관계를 말한다. 일반적으로 반응표면 법(Response Surface Method ; RSM)에서는 반응표면에 대한 적절한 통계적 모형을 가정하고, 독립변수의 여러 조건에서 실험을 수행하여 데이터를 얻은 후에 회귀분석을 통하여 반응표면을 추정한다. 추정된 반응표면 식을 이용하여 독립변수의 변화에 따른 반응변수의 변화 정도를 분석하는 민감도 분석을 행할 수 있고, 반응변수를 최대화 또는 최소화하는 독립변수의 수준조합을 찾아내어 제품 및 공정의 최적화를 꾀할 수 있다.

본 연구에서 반응표면 법을 사용하는 것은 다구찌 방법과 뉴럴 네트워크로 좁혀진 인자의 구간을 이용하여 근사적인 모형을 상정한 반응표면 식을 이용하여 정밀한 최적절삭조건을 추정하기 위함이다. 연구과정 중 공작기계 머시닝센터(DAEW OOA CE-V500)의 한계(가혹한 조건에서의 기계 멈춤 현상)로 3가지 인자에 대한 최적절삭조건을 수행할 수 없기 때문에 인자는 3개에서 2개로 줄어들었다. 반응표면 법의 방법은 인자의 개수에 따라 그 실험 방법이 달라지기 때문에, 2개의 인자에

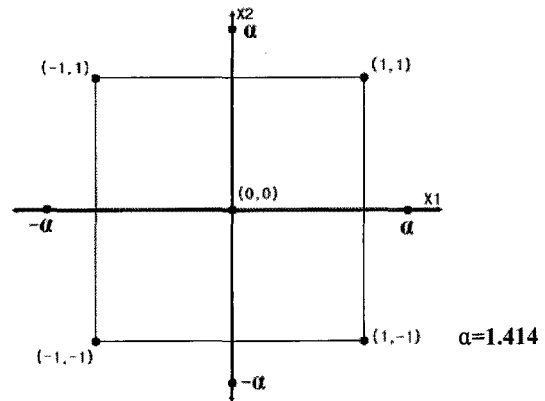


Fig. 3 Experimental plan for Central Composite Designs

Table 3 Central Composite Designs experiment plan

Central Composite Designs(block 2, a=1.414)		
No	X ₁	X ₂
1	-1	-1
2	1	-1
3	-1	1
4	1	1
5	α	0
6	-α	0
7	0	α
8	0	-α
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0
14	0	0

서 최소의 실험으로 실행할 수 있는 반응표면 법의 방법인 중심 합성계획법을 사용하였다. 이 실험계획을 테이블과 그림으로 표시하여 Table 3과 Fig. 3에 주어졌다. Table 3의 실험계획에 따라 실험을 수행한 후 중심합성계획법을 이용하여 추정식 (1)을 구하였다⁽⁶⁻⁹⁾. 계산을 위하여 상용프로그램인 MINITAB 14.12.1을 이용하였다.

$$y = \beta_0 + \beta_1 F + \beta_2 D + \beta_3 F^2 + \beta_4 D^2 + \beta_5 FD \quad (1)$$

F : Feed rate (mm/rev)

D : Depth of cut (mm)

y : Cutting volume (mm³)

Table 4 Result of $L_9(3^4)$ orthogonal array for Taguchi method

No	S (m/min)	F (mm/rev)	D (mm)	cutting volume (mm ³)
1	300	0.10	0.30	29988
2	300	0.20	0.40	53312
3	300	0.30	0.50	149940
4	500	0.10	0.40	33320
5	500	0.20	0.50	74970
6	500	0.30	0.30	69972
7	700	0.10	0.50	33320
8	700	0.20	0.30	29988
9	700	0.30	0.40	53312

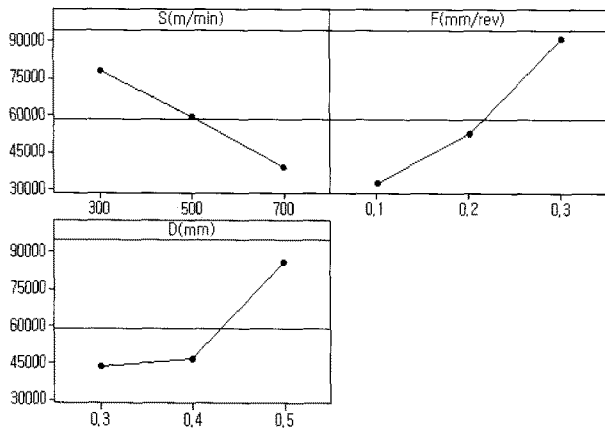


Fig. 4 Result of Taguchi method during face milling

3. 실험결과 및 고찰

3.1 다구찌 방법 중 환경적 영향에 의한 인자의 제거

다구찌 방법을 이용하여 구한 최초의 인자 구간에 대한 P20-SM45C의 $L_9(3^4)$ 직교배열의 데이터 값은 Table 4에, 각 인자 구간에 대한 절삭부olum은 Fig. 4에 주어졌다. 이 그림에서 결과 값이 클수록 더 좋은 결과를 나타내므로 최대 절삭부olum을 갖기 위해서는 스피들 회전속도는 더 느리게, 이송속도는 더 빠르게, 절입량은 더 깊게 잡아야 함을 알 수 있다. 하지만 공작기계 머시닝센터(DAEWOO ACE-V500)의 한계(가혹한 조건에서의 기계 멈춤 현상)로 3가지 인자에 대한 최적절삭조건을 수행할 수 없었다. 이는 스피들의 회전속도가 느려질수록 공작기계의 스피들에서 나오는 토크가 적어지기 때문이다. 그러므로 스피들의 회전속도는 실험조건에서 공작기계의 작동한계 이내인 500m/min으로 고정하였다.

3.2 다구찌 방법을 통한 인자 구간 설정

Fig. 4에서 이송속도(F)와 절삭 깊이(D)가 클수록 좋으므로

Table 5 Result of the cutting volume under the cutting condition determined by $L_9(3^4)$ orthogonal array

No	S (m/min)	F (mm/rev)	D (mm)	cutting volume (mm ³)
1	500	0.40	0.40	246568
2	500	0.60	0.60	629748
3	500	0.80	0.80	279888
4	500	0.40	0.60	359856
5	500	0.60	0.80	413168
6	500	0.80	0.40	279888
7	500	0.40	0.80	199920
8	500	0.60	0.40	206584
9	500	0.80	0.60	549780

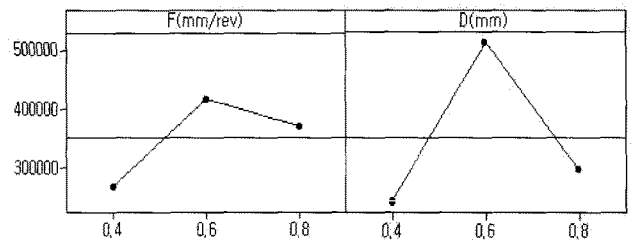


Fig. 5 Plot of the factor effect from Taguchi method

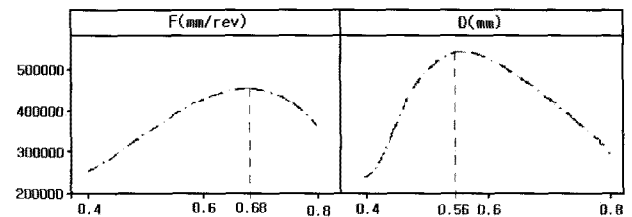


Fig. 6 Cutting volume model obtained by Neural Network

두 실험 조건을 크게 잡아서 P20-SM45C의 인자 구간을 스피들 회전속도 500m/min, 이송량 0.4~0.8mm/rev, 절입량 0.4~0.8mm으로 선정하였다. 스피들의 회전속도를 고정하고 절정한 실험조건과 그 결과 값이 Table 5에 주어졌다. Fig. 5는 Table 5의 각 인자 구간에 대한 절삭부olum으로 이 그림에서 최적 값이 이송속도 0.4~0.8mm/rev, 절삭 깊이 0.4~0.8mm 사이에 있음을 알 수 있다. 이때 R_0 는 이송량 0.6mm/rev, 절입량 0.6mm로 구해졌다.

3.3 다구찌 방법과 뉴럴 네트워크의 데이터를 이용한 인자 구간의 축소

뉴럴 네트워크에 의한 학습결과는 Table 6에, 각 인자 구간사이의 절삭부olum은 Fig. 6에 주어졌다. 이때 N_0 는 이송량 0.68mm

Table 6 Result data by Neural Network

No	S (m/min)	F (mm/rev)	D (mm)	cutting volume (mm ³)
1	500	0.40	0.40	315606
2	500	0.60	0.60	622960
3	500	0.80	0.80	289687
4	500	0.40	0.60	365135
5	500	0.60	0.80	411526
6	500	0.80	0.40	285793
7	500	0.40	0.80	207507
8	500	0.60	0.40	208866
9	500	0.80	0.60	550150

Table 7 Selection of the optimal range using Taguchi and Neural Network

F (mm/rev)	0.56 ~ 0.72
D (mm)	0.48 ~ 0.68

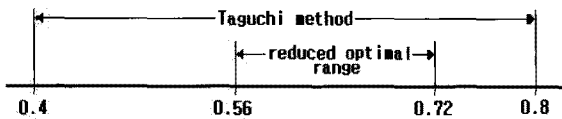


Fig. 7 Determination of the reduced optimal range in feed rate

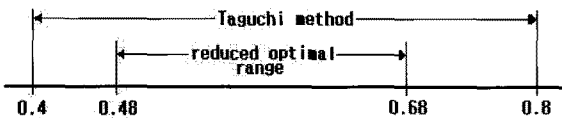


Fig. 8 Determination of the reduced optimal range in depth of cut

/rev, 절입량 0.56 mm로 구해졌다. 인자 구간의 축소를 위해 R_0 와 N_0 를 Fig. 2에 주어진 인자의 구간을 축소하는 알고리즘에 적용하였다. 결과적으로 얻어진 인자 구간은 Table 7과 Fig. 7~8에 주어졌다.

3.4 반응표면 법에 의한 최적절삭 조건

다구찌 방법과 뉴럴 네트워크로 좁혀진 인자 구간을 이용하여 정밀한 최적절삭조건을 추정하기 위해 Table 7의 축소된 인자 구간에서 Table 8의 실험을 수행하였다. Table 8은 반응표면 법 방법 중 중심합성계획법을 이용하여 구한 실험에 대한 결과이다. 이 결과에 대한 추정된 반응표면 식이 (2)에 주어졌다. 추정된 반응표면 식 (2)로부터 구한 최적절삭조건은 이송량 0.665mm/rev, 절입량 0.611 mm이었다. 다구찌 방법, 뉴럴 네트워크, 중심합성법의 이송량, 절입량 그래프가 각각 Fig. 9~10에 주어졌다. 축소

Table 8 Data of Central Composite Designs experiment plan

Central Composite Designs(block 2, a=1.414)			
No	F (mm/rev) (x ₁)	D (mm) (x ₂)	cutting volume (mm ³)
1	0.56	0.48	319872
2	0.72	0.48	535785
3	0.56	0.68	611755
4	0.72	0.68	589097
5	0.64	0.58	541117
6	0.64	0.58	521791
7	0.64	0.58	531454
8	0.53	0.58	376849
9	0.75	0.58	492502
10	0.64	0.44	438391
11	0.64	0.72	432676
12	0.64	0.58	541117
13	0.64	0.58	521791
14	0.64	0.58	531454

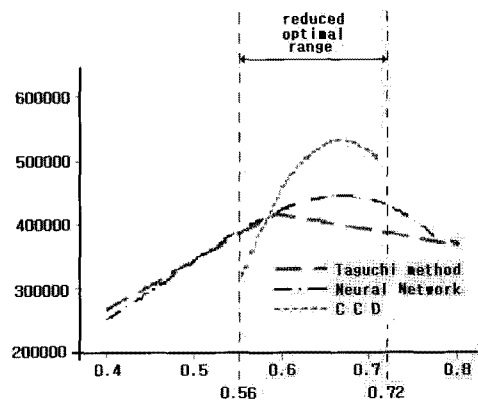


Fig. 9 Curvature of feed rate by Taguchi method, Neural Network and Central Composite Designs

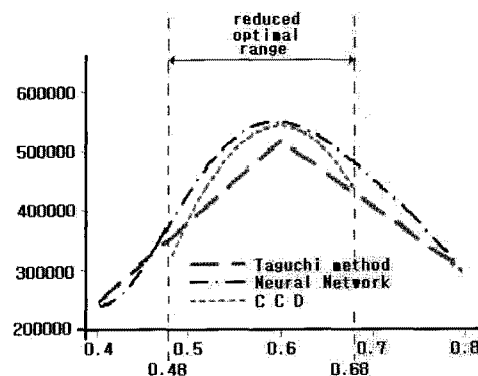


Fig. 10 Curvature of depth of cut by Taguchi method, Neural Network and Central Composite Designs

Table 9 Comparison of the cutting volume obtained by Central Composite Designs and experiments

	S (m/min)	F (mm/rev)	D (mm)	cutting volume (mm ³)
Theoretical result	500	0.665	0.611	547100
Experimental result 1				589431
Experimental result 2				569106
Experimental result 3				579268

Table 10 Comparison of the cutting volume obtained by Central Composite Designs and experiments

Average cutting volume of experimental results	579268mm ³
Standard deviation	10163mm ³ (1.75%)
Error between the theoretical and experimental results	+5.56%

된 인자 구간에서 구해진 최적절삭조건이 실제 최적절삭조건의 구간을 벗어나지 않음을 확인하였다.

$$y = 531454 + 21664F + 19148D - 17082F^2 - 16728D^2 - 13661FD \quad (2)$$

3.5 최적절삭 조건에서 이론 절삭볼륨과 실험의 비교

최종적으로 중심합성계획법에 의해서 구해진 이론 최대 절삭볼륨은 547100mm³이었고 이때의 절삭조건은 500m/min의 절삭속도, 0.665mm/rev의 이송량, 0.611mm이었다. 이렇게 얻어진 결과의 적합성을 확인하기 위해 중심합성계획법에 의해서 구해진 이론 최대 절삭볼륨과, 동일 절삭조건에서의 실제 실험을 통해서 최적 값을 비교 분석하였다. 3회 반복 실험으로 얻어진 결과가 Table 9~10에 주어졌다. 실험으로 얻어진 최대 절삭볼륨의 평균은 579268mm³으로 이론 최대 절삭볼륨과 비교할 때 약 5.56%의 오차를 보였다. 실험결과, 이론적으로 얻어진 최적 값이 실험적으로 얻어진 값에 매우 근접함이 확인되었다.

4. 결론

본 연구는 복합실험계획법을 밀링공정에 적용하였다. 밀링공정에서 다구찌 방법, 뉴럴 네트워크, 중심합성계획법을 사용하여 SM45C에서 P20 절삭공구의 절삭볼륨에 대한 최적절삭 조건을 구하고, 실제 실험값과 비교하였다.

- (1) 넓은 범위의 구간에서 다구찌 방법을 통해 대략적인 최적 조건을 선정하고, 뉴럴 네트워크를 사용하여 다구찌 방법에서 실험하지 못한 각 인자 수준 사이의 결과를 추정한 후 인자의 구간을 축소하는 알고리즘을 통해 축소된 인자 구간에서 반응표면 법을 이용하여 최대 절삭볼륨을 보이는 최적절삭조건과 추정식을 구하였다.
- (2) 최대 절삭볼륨의 이론값과 실제 실험값을 비교한 결과 5.56%의 오차를 보였다. 실험 결과로 미루어 볼 때 밀링공정에서 복합실험계획법을 적용하면 적은 수의 실험으로 실제 값에 근접할 수 있음을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2009년도 연구재단 특정기초 연구비로 지원된 연구결과입니다. (20090083820)

참 고 문 헌

- (1) Choi, Y. C., Kim, D. W., Chang, Y. S., Cho, M. W., and Hea, Y. M., 2003, "Optimization of High Speed Machining Process using Constrained R-T Characteristic Curve," *Proceedings of the ksmte spring conference*, pp. 100~105.
- (2) Kwak, J. S., 2005, "Application of Taguchi and Response Surface Methodologies for Geometric Error in Surface Grinding Process," *International journal of machine tools and manufacture*, Vol. 45, No. 3, pp. 327~334.
- (3) Hou, T. H., Su, C. H., and Liu, W. L., 2007, "Parameters Optimization of a Nano Particle Wet Milling Process using the Taguchi Method, Response Surface Method and Genetic Algorithm," *Powder Technology*, Vol. 173, No. 3, pp. 153~162.
- (4) Tsao, C. C., and hocheng, H., 2008, "Evaluation of Thrust Force and Surface Roughness in Drilling Composite Material using Taguchi Analysis and Neural Networks," *Journal of materials processing technology*, Vol. 203, No. 1, pp. 342~348.
- (5) Lee, H. W., and Kwon, W. T., 2010, "Determination of the Minute Region for RSM to Identify the Optimum Cutting Conditions during Turning on CNC Lathe," *Journal of Mechanical Sciences and Technology*, Vol. 24, No. 8, pp. 1637~1645.
- (6) Tung, H. H., and Chi, H. S., 2007, "Parameters

- Optimization of a Nano-particle Wet Milling Process using the Taguchi Method, Response Surface Method and Genetic Algorithm,” *Powder Technology*, Vol. 173, No. 3, pp. 153~162.
- (7) Kuang, H. F., and Hung, Y. C., 1997, “An Accuracy Model for the Peripheral Milling of Aluminum Alloys using Response Surface Design,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 72, No. 1, pp. 42~47.
- (8) Ghodke, S. K., Ananthanarayan, L., and Rodrigues, L., 2009, “Use of Response Surface Methodology to Investigate the Effects of Milling Conditions on Damaged Starch, Dough Stickiness and Chapatti Quality,” *Food Chemistry*, Vol. 112, No. 4, pp. 1010~1015.
- (9) Lee, H. W., and Kwon, W. T., 2010, “Global Optimization of the Turning Operation Using Response Surface Method,” *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 19, No. 1, pp. 114~120.