

선삭가공공정에서 RSM을 이용한 가공공정의 포괄적 최적화

이현욱*, 권원태⁺

(논문접수일 2009. 12. 01, 심사완료일 2009. 12. 18)

Global Optimization of the Turning Operation Using Response Surface Method

Hyun-Wook Lee*, Won-Tae Kwon⁺

Abstract

Optimization of the turning process has been concentrated on the selection of the optimal cutting parameters, such as cutting speed, feed rate and depth of cut. However, optimization of the cutting parameters does not necessarily guarantee the maximum profit. For the maximization of the profit, parameters other than cutting parameters have to be taken care of. In this study, 8 price-related parameters were considered to maximize the profit of the product. Regression equations obtained from RSM technique to relate the cutting parameters and maximum cutting volume with a given insert were used. The experiments with four combinations of cutting inserts and material were executed to compare the results that made the profit and cutting volume maximized. The results showed that the cutting parameters for volume and profit maximization were totally different. Contrary to our intuition, global optimization was achieved when the number of inserts change was larger than those for volume maximization. It is attributed to the faster cutting velocity, which decreases processing time and increasing the number of tool used and the total tool changing time.

Key Words : Response surface method(반응 표면법), Global maximization(포괄적 최적화), Profit maximization(이익 최대화), SQP method(SQP 법)

1. 서론

선삭가공용 인서트와 금속소재의 조합가지 수가 증가하고 있는 지금, 선삭가공에 있어 생산효율의 향상과 인서트의 지

출비 감소, 최대 이익률을 위한 최적조건 선정이 필요하다. 기존의 연구는 영향을 끼치는 주요 인자를 파악하는데 있어 시간과 비용을 줄이고자 다구치 방법^(1-4,6)과 반응표면법^(1-4,7) 같은 실험계획법과 뉴럴네트워크^(5,6)를 사용하여 분석하였

* 서울시립대학교 기계정보공학과 대학원
+ 교신저자, 서울시립대학교 기계정보공학과 (kwon@uos.ac.kr)
주소: 130-743 서울시 동대문구 전농동

다. 또한 다구치 방법으로 초기범위를 구하고, 뉴럴 네트워크로 범위를 축소시킨 후, 반응표면법으로 정확한 최적조건을 구하는 방법이 발표되었다.⁽⁸⁾ 하지만, 실험계획법이나 뉴럴네트워크로 구한 최적조건은 공구의 수명을 최적화하는 절삭조건이므로 이익률을 최대화하는 절삭조건과는 일치하지 않는다. 즉, 공구의 수명을 최대화하는 조건은 다른 이유로 비용을 증가시킬 수 있기 때문에 전체 최적화가 아닌 부분 최적화가 될 수 있다. 전체 최적화를 위하여 영역 제거법을 확장하여 계산량을 줄였다.⁽⁹⁾ 전체 최적화를 위해 SQP방법을 사용하여 최적값에 수렴하였다.⁽¹⁰⁾

이 논문에서는 반응표면법으로 구해진 절삭조건과 공구 수명과의 관계식과 여러 가지 제약조건을 고려하여 최대 이익률을 보장하는 포괄적 최적화(global optimization)를 수행하였다. 구해진 포괄적 최적화의 해를 공구수명 최대화의 해와 비교하여 실제 비용면에서 최적임을 보였다.

2. 실험 방법

2.1 실험장치

본 연구에서 사용한 공작기계는 CNC선반(Hyundai Hit-15)이고, 절삭공구는 SNGN 120408 규격의 P20(Tungsten carbide insert, TaeguTec), AB30(Ceramic insert, TaeguTec)이며, 절삭재료는 SM45C(AISI45), SCM440이다. 건식절삭으로 절삭하였고, 광학현미경(Bestec vision, Xi-Cam)을 이용하여 공구의 프랭크면 마멸량을 측정하였으며, 마멸량 300 μ m를 공구 수명으로 판정하였다. SM45C와 SCM440의 화학성분과 기계특성을 Table 1에 나타내었다. 최대이익률의 최적화를 위해 SQP(Sequential Quadratic Programming) 방법이 사용되었다.^(10,11)

2.2 반응표면법을 이용한 추정식

반응표면법은 여러 가지 방법이 있는데 이 연구에서는 박스-베켄(Box-Behken) 방법을 선택하였다. 이를 위해 Table 2의 실험을 수행하였는데 이 Table에 주어진 -1, 0, 1이 Table 3에 주어졌다. 최대절삭부름을 위한 절삭조건은 -1과 1 사이에 존재함이 다른 연구⁽⁸⁾에서 이미 밝혀졌다. 이 실험을 통해 최대 절삭부름을 갖는 수식을 상용 프로그램인 MINITAB 14.12.1을 이용하여 추정식 (1)을 구하였다.

$$y = \beta_0 + \beta_1 V + \beta_2 F + \beta_3 D + \beta_4 V^2 + \beta_5 F^2 + \beta_6 D^2 + \beta_7 VF + \beta_8 VD + \beta_9 DF$$

V : Cutting speed(m/min)

F : Feed rate(mm/rev)

D : Depth of cut(mm)

y : Cutting volume(mm³)

2.3 포괄적 최적화

반응표면법을 이용하여 찾아낸 절삭부름에 관한 추정식과 시간에 관한 추정식을 이용하여 생산시간, 생산비용의 최소화과 공구수명, 이익률의 최대값을 구하기 위하여 Table 4와 같이 고정변수를 설정하였다. 설정된 고정변수 8개는 각

Table 1 Chemical composition and mechanical property of SM45C and SCM440

		SM45C	SCM440
Chemical Property (wt%)	C	0.42~0.48	0.38~0.43
	Si	0.15~0.35	0.15~0.35
	Mn	0.60~0.90	0.60~0.85
	P	0.030 Max	0.030 Max
	S	0.035 Max	0.030 Max
	Cr	-	0.90~1.20
	Mo	-	0.15~0.30
Mechanical property	Tensile strength (N/mm ²)	470.7 Min	980.7 Min
	Hardness(HRC)	11~25.6	29.8~35.5
	Yield point (N/mm ²)	343.2 Min	834 Min

Table 2 Experimental plan for RSM technique

Number	Coded variable		
	V	F	D
1	-1	-1	0
2	-1	1	0
3	1	-1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	1
7	1	0	-1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	-1	1
11	0	1	-1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

Table 3 Revised cutting conditions for each combination of inserts and work materials for RSM technique

	Cutting velocity(m/min.)		Feed rate (mm/rev.)		Depth of cut (mm)	
P20-SM45C	-1	160	-1	0.1	-1	0.34
	0	185	0	0.2	0	0.41
	1	210	1	0.3	1	0.48
P20-SCM440	-1	160	-1	0.1	-1	0.28
	0	225	0	0.2	0	0.38
	1	290	1	0.3	1	0.48
AB30-SM45C	-1	340	-1	0.28	-1	0.32
	0	410	0	0.44	0	0.37
	1	480	1	0.6	1	0.42
AB30-SCM440	-1	340	-1	0.35	-1	0.32
	0	410	0	0.5	0	0.39
	1	480	1	0.65	1	0.46

각 단위 재료비, 단위 공구비, 단위 인건비, 단위 전기비, 기계의 단위 감가상각비, 인서트 교체시간, 공작물 교체시간, 최종 제품가격 등이다. 포괄적 최적화(global optimization)를 위한 조건은 다음과 같다.

Maximization

$$Profit = \frac{[W_{structure} \times N_{materials}] - [W_{expense}]}{T_{production}} \quad (3)$$

Minimization

$$T_{production} = [T_{process} \times N_{tools}] + [T_{tools\ change} \times N_{tools}] + [T_{material\ change} \times N_{materials}] \quad (4)$$

$$W_{expense} = [W_{tools} \times N_{tools}] + [W_{electricity}/sec \times T_{production}] + [W_{work}/sec \times T_{tools\ change} \times N_{tools}] + [W_{work}/sec \times T_{material\ change} \times N_{materials}] \quad (5)$$

Control constraints

$$-1 < V(cutting\ speed) < 1 \quad (6)$$

$$-1 < F(Feed\ rate) < 1 \quad (7)$$

$$-1 < D(Depth\ of\ cut) < 1 \quad (8)$$

$$1 \leq N_{tools}, N_{materials} \quad (9)$$

식 (3)에서 본 바와 같이 목적함수는 이익률로 이 값을 최대화하려고 한다. $W_{structure}$, $N_{materials}$, $W_{expense}$, $T_{production}$ 은 각각 생산된 제품 1개의 가격, 생산된 제품의 개수, 생산비용, 생산시간을 나타낸다. 식 (4)는 생산시간을 나타내며 $T_{process}$, N_{tools} , $T_{tools\ change}$, $T_{material\ change}$, $N_{materials}$ 는 각각 공정시간, 인서트 개수, 인서트 교환 시간, 재료 교환 시간, 재료개수를 나타낸다. 식 (5)는 생산비용을 나타내며 W_{tools} , $W_{electricity}$, W_{work} 는 각각 인서트의 가격, 단위시간당 전기세, 단위시간당 인건비를 나타낸다. 이 연구에서는 생산시간과 비용의 최소화를 또한 목표로 한다. 식 (6), (7), (8), (9)는 제한조건으로 각각 절삭속도, 이송량, 절입량, 인서트와 재료 개수를 나타낸다.

이와 같은 최적화를 수행하기 위하여 본 연구에서 사용한 방법은 SQP(Sequential Quadratic Programming)방법이다.⁽¹⁰⁻¹²⁾ 이 방법은 최적화 방법 중에 수학적으로 가장 강력한 기법으로 알려져 있다. SQP법은 비선형 방정식을 풀기 위하여 반복계산을 통해 최적해를 구한다. 각 반복계산에 있어서 2차 부속 문제의 해를 구하는데, 이 부속 문제는 라그랑지 함수의 2차 근사치로 구성되는 목적 함수에 의해 정의된다. 탐색방향으로의 강하 함수를 최소화 하여 이동거리를 구하는 방법으로 Taylor 근사에 의해 문제 정의는 다음과 같다.

$$\text{Minimize} \quad q(x) = c^T p_k + 0.5p_k^T H_k p_k \quad (10)$$

$$\text{Subject to} \quad \nabla g_i^T + g_i^k \leq 0 \quad i \in I_1 \quad (11)$$

$$\nabla h_i^T + h_i^k = 0 \quad i \in I_2 \quad (12)$$

여기서, H_k 는 라그랑지 함수의 2차 도함수(Hessian)의 근사치를 x_k 는 현 반복계산에서의 설계변수 값을 나타낸다. p_k 는 현 반복계산에서의 부속 문제에 있어서 구해진 해를 나타낸다. 그러면 새로운 설계 변수의 값 x_{k+1} 은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$x_{k+1} = x_k + a_k p_k \quad (13)$$

위에서 a_k 는 탐색방향 p_k 로의 이동거리이며 라인 서치(line search)를 실시함으로써 구해진다.

여기서 최적조건이 얻어지면 계산을 종료하고 그렇지 못하면 H_k 가 BFGS(Broyden Fletcher Goldfarb Shanno Method)

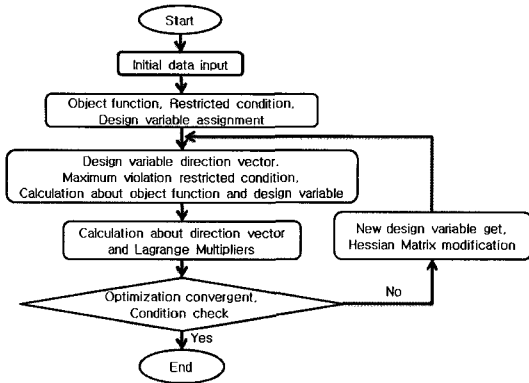


Fig. 1 Flow chart of the SQP algorithm

Table 4 Fixed variables for optimum condition

Variable	Unit
Material unit cost	100,000 (Won)
Insert unit cost	3,000 (Won/unit)
Cost of labor	2.5 (Won/sec)
Electricity bill	4 (Won/sec)
Depreciation amount	0.25 (Won/sec)
Time of insert change	30 (Sec/unit)
Time of material change	180 (Sec/unit)
Cost of finished product	200,000 (Won)

에 의해 개선되어 반복계산을 수행하게 된다. BFGS법은 비 제약설계의 계산 시 매 반복 회마다 헤시안행렬(Hessian Matrix)을 수정하는 방법으로 정확한 라인서치법이 사용되면 양정의 근사 헤시안행렬을 유지함을 보일 수 있는데 이 기법을 Quasi-Newton Method라고 한다. 이와 같은 과정을 통한 프로그램 수행과정은 Fig. 1과 같다.

3. 실험결과

3.1 반응표면법의 결과

반응표면법을 이용하여 Table 3의 축소된 인자 수준구간에서 Table 2의 실험을 수행하였다. 실험결과 얻어진 P20-SM45C, P20-SCM440, AB30-SM45C, AB30-SCM440의 추정식을 Table 5에 나타내었다. 식은 x_1, x_2, x_3 의 1, 2차식과 x_1x_2, x_1x_3, x_2x_3 에 관한 식으로 표시되었다. 이 식은 x_1, x_2, x_3 에 대해 비선형이므로, 선형식으로 표시되지 않는 수

Table 5 Optimal cutting condition obtained RSM technique

Insert-Material	Factor	Optimum point
P20-SM45C	Cutting velocity	189.425m/min
	Feed rate	0.1492mm/rev
	Depth of cut	0.4366mm
	Regression Equation	$y=286130+1156.9x_1-18041.2x_2+4336.58x_3-24485.6x_1^2-33433.0x_2^2-24321.1x_3^2-12842.7x_1x_2-28766.1x_1x_3-35907.1x_2x_3$
P20-SCM440	Cutting velocity	212.8313m/min
	Feed rate	0.1463mm/rev
	Depth of cut	0.3691mm
	Regression Equation	$y=251340-27165.2x_1-28835.0x_2-9680.84x_3-54871.6x_1^2-23698.9x_2^2-78457.9x_3^2-11944.1x_1x_2-4457.15x_1x_3+10107.1x_2x_3$
AB30-SM45C	Cutting velocity	424.9251m/min
	Feed rate	0.519mm/rev
	Depth of cut	0.3836mm
	Regression Equation	$y=258913+17875x_1+19146.9x_2+10530x_3-37770.5x_1^2-18177.9x_2^2-20532.1x_3^2-6146.4x_1x_2-1082.2x_1x_3+2086.7x_2x_3$
AB30-SCM440	Cutting velocity	465.174m/min
	Feed rate	0.512105mm/rev
	Depth of cut	0.46659mm
	Regression Equation	$y=347373+41602.0x_1-28798.5x_2+19653.8x_3-27611.2x_1^2-103402.0x_2^2-50390.3x_3^2-56186.8x_1x_2-17675.7x_1x_3-4980.37x_2x_3$

식까지 표현이 가능하다. RSM으로 알아낸 최적 절삭조건을 살펴보면 모든 조건이 Table 3에서 주어진 -1과 1 사이에 있음을 알 수 있다. 최적조건이 범위 내에 존재하기 때문에 한 세트의 실험으로 RSM을 이용한 최적조건과 실험식을 구할 수 있었다. 최적조건은 실험식을 이용하여 구하였는데, 이 실험식의 정확성을 확인하기 위한 확인실험이 행하여졌다. Table 5에서 밝혀진 최적조건으로 실험한 결과와 Table 5에서 알아낸 식으로 추정된 결과를 비교하여 Table 6에 주

어졌다. 이 식에서 P20-SM45C가 가장 좋은 결과로 0.2% 정도의 오차를 보이고 있으며 AB30-SM45C가 가장 큰 차이인 10.7%의 오차를 보이고 있다. P20의 경우 절삭속도도 느리고 이송속도도 느리기 때문에 오차가 적은 반면, AB30의 경우 절삭속도도 빠르고 이송속도도 크기 때문에 예측치와 실제 실험치의 차이가 커진 것으로 사료된다.

3.2 이익률의 최대화를 위한 최적화

산업현장에서는 이윤추구를 위한 이익률의 최대화가 필

Table 6 Cutting volume of optimal cutting condition from Taguchi method and RSM technique

		Average of three experimental results(mm ³)	Theoretical estimation (mm ³)	Difference (%)
P20-SM45C	RSM	292802	292200	0.2
P20-SCM440	RSM	244832	262200	-7.1
AB30-SM45C	RSM	299129	267000	10.7
AB30-SCM440	RSM	345257	362600	-5.0

요하다. 이를 위해 Fig. 2의 순서도의 과정을 통해 이익률의 최대화를 위한 최적화를 하였다. 먼저 제한조건인 절삭속도(V), 이송량(F), 절입량(D)을 초기값 0으로 하여 시간에 관한 추정식으로부터 해당 조건에서의 한 개의 인서트의 가공 시간을 구하고, 절삭볼륨에 관한 추정식으로부터 같은 볼륨을 절삭 시 인서트의 개수를 구한다. 그리고 같은 볼륨을 절삭 할 때의 재료의 개수를 구한다. 다음으로 생산시간은 인서트의 개수에 따른 가공시간과 인서트 교환시간, 재료의 개수에 따른 재료 교환시간의 합으로 정의한다. 생산비용은 인서트의 개수에 따른 비용과 생산시간에 따른 전기세와 인서트 교환과 재료 교환에 따른 인건비의 합으로 정의한다. 목적함수로 이익률은 생산시간당 재료의 개수에 따른 완제품의 가격과 생산비용의 차로 정의한다. 이익률의 값이 최대가 될 때까지 초기값을 변형시키면서 반복 수행한다.

이익률의 최적화를 위한 프로그램으로 MATLAB 7.6.0의 Optimtool을 사용하였고, SQP법을 사용하는 Solver로 fmincon을 사용하였다. 같은 볼륨을 절삭할 때의 절삭시간과 필요한 절삭공구의 개수, 이익률, 그리고 이익률의 최대화를 보이는 인자들의 결과를 Table 7에 나타내었다.

AB30이 P20보다 고속으로 가공이 가능하기 때문에 생산비용면에서 AB30이 더 크더라도 생산시간이 단축되므로 이익률에서는 AB30이 더 좋은 결과를 나타내었다. 그리고 같은 볼륨을 절삭할 때 최대절삭볼륨을 보이는 최적조건과 최대이익률을 보이는 최적조건에서의 절삭시간, 인서트교환시간, 재료교환시간의 비교그림을 Fig. 3에 나타내었다.

P20의 경우 전체 최적화와 볼륨 최적화에서의 전체 가공시간의 차가 크다. 이는 전체 최적화의 최적조건에서 가공할 때 볼륨 최적화의 최적조건보다 고속으로 가공하기 때문에 절삭시간은 절반으로 단축되지만 인서트의 교환횟수가 늘어나서 전체가공시간이 AB30의 경우보다 크다. 또한 AB30의 경우 한 개의 인서트로 가공할 수 있는 볼륨이 P20보다 커서 재료교환시간이 짧다는 것을 알 수 있다. AB30의 경우 전체 최적화가 볼륨최적화보다 전체가공시간이 줄었지만 차가 크지 않았다. 이는 AB30은 고속가공 인서트이기 때문에 이익률을 위한 최적조건과 볼륨을 위한 최적조건이 크게 차이가 없기 때문이다.

그리고 각 조건에서의 생산비용을 Table 8에 나타내었다. 모든 절삭공구와 절삭재료의 조합에서 전체최적화를 위한 생산비용이 볼륨 최적화를 위한 생산비용보다 크지만 생산시간이 짧기 때문에 이익률이 크다는 것을 알 수 있다.

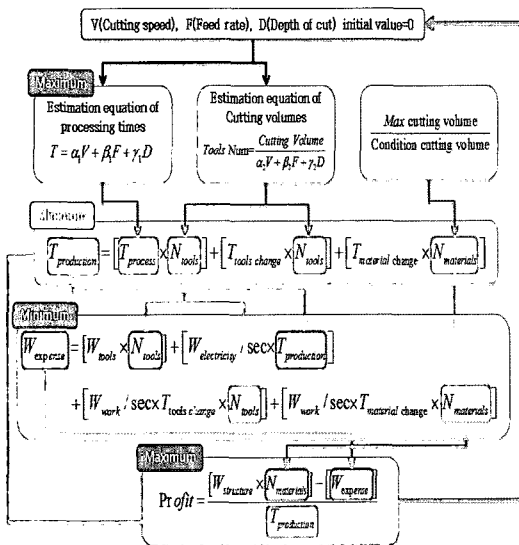


Fig. 2 Flow chart of the algorithm to determine the maximum profit

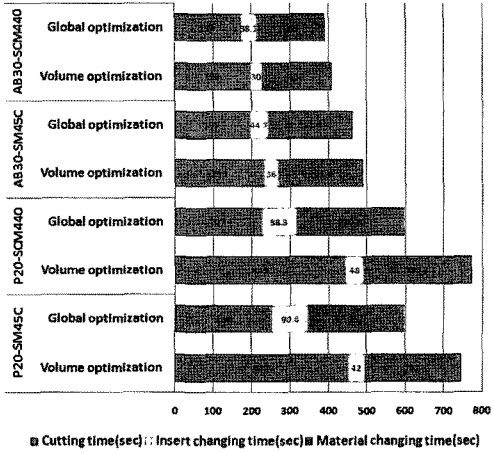


Fig. 3 Comparison of the global and volume optimization in terms of cutting time, insert changing time and material changing time

Table 7 Condition of at max volumes and profit

	P20-SM45C		P20-SCM440	
	volume (mm ³)	Profit (Won/sec)	volume (mm ³)	Profit (Won/sec)
Max				
Cutting speed (m/min)	189.425	323.6	212.833	225.085
Feed rate (mm/rev)	0.1492	0.1864	0.1463	0.22489
Depth of cut(mm)	0.4366	0.3533	0.3691	0.65019
Cutting ime(sec)	452	254	443	227
Insert(num)	1.4	3.02	1.6	2.96
Profit(Won/sec)	183.92	243.99	177.57	227.38

	AB30-SM45C		AB30-SCM440	
	volume (mm ³)	Profit (Won/sec)	volume (mm ³)	Profit (Won/sec)
Max				
Cutting speed (m/min)	424.9	445.1	465.174	503.73
Feed rate (mm/rev)	0.519	0.5751	0.5121	0.55
Depth of cut(mm)	0.3836	0.325	0.4659	0.4907
Cutting time(sec)	233	197	198	174
Insert(num)	1.2	1.49	1	1.27
Profit(Won/sec)	254.44	298.7	304.29	315.35

Table 8 Production cost of the maximum profit and maximum volume

		Production cost(Won)
P20-SM45C	Maximum Profit	6743.00
	Maximum Volume	11540.00
P20-SCM440	Maximum Profit	7409.00
	Maximum Volume	11237.00
AB30-SM45C	Maximum Profit	4819.25
	Maximum Volume	6020.75
AB30-SCM440	Maximum Profit	4317.00
	Maximum Volume	5152.50

4. 결론

본 연구에서 선삭공정에서 SM45C, SCM440의 절삭재료와 P20, AB30 절삭공구를 가지고 반응표면법으로 구한 최대 볼륨을 위한 최적절삭조건과 최대 이익률을 보장하는 최적조건을 선정하고자 포괄적 최적화를 수행하였다.

- (1) 반응표면법을 이용하여 축소된 인자 수준에서 최대 절삭볼륨을 보이는 최적절삭조건과 추정식을 구하였다.
- (2) 최대 절삭볼륨의 이론값과 실제 실험값을 비교한 결과 P20-SM45C의 오차가 0.2%, P20-SCM440의 오차가 7.1%, AB30-SM45C의 오차가 10.7%, AB30-SCM440는 5.0%의 오차를 보였다.
- (3) 절삭볼륨과 시간에 관한 추정식을 사용하고, 생산시간과 생산비용의 방정식을 통한 SQP법을 이용하여 최대 이익률을 위한 최적화 문제를 해결하였다.
- (4) 이익률의 최대화를 위한 절삭조건은 최대 절삭볼륨을 위한 절삭조건보다 고속의 조건인데 고속가공을 통해 절삭공구의 수명이 감소되고, 절삭공구의 사용개수와 절삭공구의 교환을 위한 인건비가 늘어나지만 생산시간이 크게 감소되기 때문에 전체 최적화를 위한 절삭조건에서의 이익률이 최대볼륨을 위한 최적조건에서의 이익률보다 크다는 것을 알 수 있다.
- (5) 절삭공구 AB30의 이익률이 P20의 이익률보다 더 커짐을 보였다. 이것은 AB30이 P20보다 고속가공이 가능함에 따라 절삭시간이 단축되었고, AB30이 세라믹 공구로 절삭공구 교환회수가 적었기 때문이다.

후 기

이 논문은 2009년도 서울시립대학교 교내학술연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) Aggarwal, A., Singh, H., Kumar, P., and Singh, M., 2008, "Optimizing power consumption for CNC turned parts using response surface methodology and Taguchi's technique-A comparative analysis," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 200, pp. 373~384.
- (2) Kwak, J.-S., 2005, "Application of Taguchi and response surface methodologies for geometric error in surface grinding process," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 45, 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, pp. 153~162.
- (4) Vining, G. G., 1990, "Combining Taguchi and Response Surface Philosophies: A Dual Response Approach," *Journal of Quality Technology*, Vol. 22, No. 1, pp. 38~45.
- (5) Davim, J. P., Gaitonde, V. N., and Kamik, S. R., 2008, "Investigations into the effect of cutting conditions on surface roughness in turning of free machining steel by ANN models," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 205, pp. 16~23.
- (6) Wu, S.-J., Shiah, S.-W., and Yu, W.-L., 2009, "Parametric analysis of proton exchange membrane fuel cell performance by using the Taguchi method and a neural network," *Renewable Energy*, Vol. 34, pp. 135~144.
- (7) Ferreira, S. L. C., Bruns, R. E., Ferreira, H. S., Matos, G. D., David, J. M., Brandão, G. C., da Silva, E. G. P., Portugal, L. A., dos Reis, P. S., Souza, A. S., and dos Santos, W. N. L., 2007, "Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods," *Analytica Chimica Acta*, Vol. 597, pp. 179~186.
- (8) Lee, H.-W. and Kwon, W. T., "Determination of the minute region for RSM to identify the optimum cutting conditions during turning on CNC lathe," submitted for publication.
- (9) Oh S.-H. and Lee, B.-C., 2000, "A Global Optimization Algorithm Based on the Extended Domain Elimination Method," *The Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 24, No. 1, pp. 240~249.
- (10) Mo, J., Zhang, K., and Wei, Z., 2006, "A variant of SQP method for inequality constrained optimization and its global convergence," *Journal of Computational and Applied Mathematics*, Vol. 197, pp. 270~281.
- (11) Sun., W., 1998, "Newton's method and quasi-Newton-SQP method for general LC constrained optimization," *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 92, pp. 69~84.
- (12) von Schwerin, M., Deutschmann, O., and Schulz, V., 2000, "Process optimization of reactive systems by partially reduced SQP methods," *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 24, pp. 89~97.