한국공작기계학회 2000년도 추계학술대회 논문집 pp.279~284

직교배열법에 의한 선삭가공시 칩절단성 평가

배병중, 박태준(경북대 대학원), 양승한, 이영문(경북대 기계공학부)

Chip breakability evaluation in turning by an orthogonal array method

Bae Byong-Jung, Park Tae-Joon(Graduate School, Kyungpook National Univ.),
Yang Seung-Han, Lee Young-Moon (Kyungpook National Univ.)

Abstract

The object of this paper is to evaluate the chip breakability using the experimental equation of surface roughness, which is developed in turning by an orthogonal array method. $L_9(3^4)$ orthogonal array method, one of fractional factorial design has been used to study effects of main cutting parameters such as cutting speed, feed rate and depth of cut, on the surface roughness. The evaluation of chip breakability is used the chip breaking index(C_B), non-dimensional parameter. And the analysis of variance (ANOVA)-test has been used to check the significance of cutting parameters. Using the result of ANOVA-test, the experimental equation of chip breakability, which consists of significant cutting parameters, has been developed. The coefficient of determination of this equation is 0.866.

1. 서론

최근 절삭공정의 무인화 추세로 인하여 절삭시 생성되는 칩의 효율적 처리는 매우 중요한 문제로 대두되고 있다. 고속절삭시 생성되는 연속형 칩은 처리자체의 어려움이 있을 뿐만 아니라 절삭가공표면을 손상시키며, 공작기계자체 또는 공작물에 엉켜 정상적인 절삭작업을 방해하기 때문에 원활한 절삭가공이 이루어지기 위해서는 적절한 칩의 제어가 이루어져야 한다.

Nakayama[1]는 칩표면의 변형률이 칩재료의 파단 변형률에 달했을 때 칩의 절단이 이루어진다는 전제하에, 칩의 절단 여부를 결정하는 요소로서 공작물재질, 칩두께 및 칩굴곡반경을 제시하였다. 공구 설계기술의 발달과 더불어 칩브레이커의 형상도 방해물형에서 홈형 및 랜드앵글형으로 이행하였으며 칩제어의 범위도 상당히 넓어졌으나, 이와 같은 개선은 아직도 비과학적인 시행착오법에 의존하고 있는 실정이다.[2]

최근 李등[3]은 칩절단특성 평가를 위한 파라미터로서 칩절단지수, C_B를 제시하였으며, 칩의 과잉제어 여부에 대한 한계 설정을 위하여 칩형상 및 비절삭에너지에 대한 고찰을 행하였다. 그는 칩절단지수, C_B의 값이 0.05 ~ 0.2일 때의 칩을 적정제어된 칩이라 하였다.

또한 기존의 절삭에 관한 연구들은 대부분 한번에 하나의 인자만을 변화시켜 실험함으로 많은 실험량이 요구되어 왔다.

이러한 문제점들을 해결하기 위해 대두된 방법이 실험횟수를 줄이면서 통계적인 방법을 사용할 수 있는 실험계획법(design of experiments)을 이용하는 것이다. Wu[4]는 처음으로 공구수명연구에 실험계획법의 하나인 반응표면법(response surface

methodology)을 이용하였다. Choudhury[5]는 고경도강의 표면거칠기 예측 실험에서 2^3 요인계획법(2^3 factorial design)과 반응표면법을 이용하였다. 또한 Yang[6]은 다구찌방법(Taguchi method)를 이용하여 표면거칠기를 최소로 하는 최적 조건을 찾았다. 하지만 칩절단성에 관한 연구의 경우 칩절단성을 수치로 나타내는 것에 대한 어려움 때문에 실험계획법을 이용한 논문이 거의 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 칩절단지수, C_B와 3^n일부실시법(frictional factorial design)의 하나인 $L_9(3^4)$ 직교배열법 (orthogonal array method)을 이용하여 칩절단특성을 평가하였다.

2. 칩절단특성평가를 위한 파라미터

2.1 Nakayama 의 칩절단 한계조건

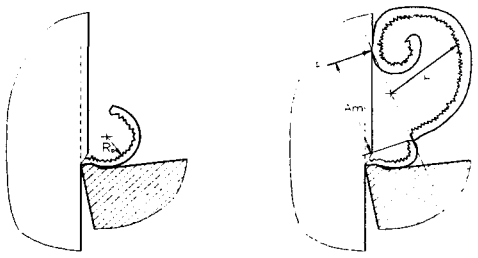
Nakayama[1]는 칩표면의 변형률이 파단변형률(ε_f)이상이 되면 칩의 절단이 이루어진다는 전제하에 칩의 파단변형률, 칩두께 및 칩굴곡반경에 대한 식(1)을 제시하였다.

$$\varepsilon_f \le \frac{t_c}{2}\left(\frac{1}{R_O}-\frac{1}{R_L}\right) \qquad (1)$$

여기서, ε_f은 칩의 파단변형률, t_c는 칩두께, R_O는 절단이 이루어지기 전의 칩의 굴곡반경, R_L은 절단이 이루진 후의 칩의 굴곡반경이다.

Fig.1[a]에서 보는 바와 같이 절단전의 칩의 형상은 공구를 떠난 후 아무런 방해를 받지 않으므로 진원에 가깝게 생성되며, 이 때의 칩굴곡반경, R_O는 고속카메라 촬영등에 의해 측정가능하나 실용적이지 못하다.

칩의 선단이 공작물 표면에 닿게 되면 Fig.1[b]에 나타낸 바와 같이 피삭재가 칩에 작용하는 반력 F에 의한 굽힘 모멘트가 발생하고, 모멘트 값이 칩의 절단에 필요한 크기에 다다를 때까지 칩은 계속 생성되며 이러한 과정에서 칩의 형상은 변하게 된다. 따라서 절단 후의 칩의 형상은 진원에서 벗어나며 칩굴곡반경 R_L을 결정하기가 어렵게 된다.



(a) Before chip breaking (b) After chip breaking

Fig. 1 Chip curl radius.

2.2 칩절단지수(C_B)

칩의 절단정도를 나타내기 위하여 본 연구에서는 칩절단지수(chip breaking index), C_B[3]를 도입하였다.

Fig.1[b]에서 보는 바와 같이 칩의 절단이 이루어지는 순간 피삭재가 칩에 작용하는 반력을 F, 절단지점까지의 수직거리를 A_m이라 하면 칩절단 굽힘모멘트 $M=A_m \cdot F$이다. 모멘트 암 A_m이 절단칩의 길이 l_c에 비례하고 ($A_m=k \cdot l_c$), 두께 t_c, 폭 b_c인 칩에 작용하는 반력 F가 칩의 단면적에 비례한다고 가정하면 칩절단 굽힘모멘트 M은 식(2-1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$M = A_m F = k l_c b_c t_c F_u \qquad (2-1)$$

여기서, A_m는 모멘트 암(mm), F는 칩에 작용하는 반력(N), F_u는 칩단면 단위면적당 작용하는 반력(N/mm^2), k는 비례상수 ($0<k<1$)이다.

한편, 칩의 파단응력을 $\sigma_f(N/mm^2)$라 하면, 칩절단 굽힘모멘트 M은 식(2-2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$M = \frac{\sigma_f b_c t_c^2}{6} \qquad (2-2)$$

식(2-1), 식(2-2)를 등치시킨 후, 측정가능한 값과 결정하기 어려운 값을 분리하여 정리하면 식(3)과 같이 나타낼 수 있다. 식(3)에서 C_B가 칩절단지수(chip breaking index)이다.

$$C_B = \frac{6kFu}{\sigma_f} = \frac{t_c}{l_c} \qquad (3)$$

3. 직교배열법

실험계획법이란 실험에 대한 계획방법을 의미하는 것으로, 해결하고자 하는 문제에 대하여 실험을 어떻게 행하고, 데이터를 어떻게 취하며, 어떠한 통계적 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 실험횟수로 최대의 정보를 얻을 수 있는가를 계획하는 것이라고 정의할 수 있다. 따라서 하나의 실험계획법을 만들었다고 하는 것은 해결하고자 하는 문제에 대하여 인자(factor)를 선정하고, 실험방법을 택하였으며, 실험순서를 정하고, 실험 후 얻어지는 데이터에 대한 최적분석방법을 선택하였다는 의미이다. 실험계획법에서 많이 사용되는 데이터의 분석방법으로는 분산분석(analysis of variance, ANOVA), 상관분석(correlation analysis), 회귀분석(regression analysis)등이 있다.

3^n 요인계획법이란 n 개의 인자에 대해 각각의 인자의 수준(level)을 3 가지로 – 0, 1, 2 또는 -1, 0, 1 으로 나타낸다 – 하여 실험을 수행하여 각 인자의 유의성(significance)을 판정하는 방식을 말한다. 4 가지 인자의 모든 효과를 구하려면 실험의 크기를 34=81 회로 하여 인자들의 주효과(main effect)와 교호작용(interaction)을 구해야 한다. 하지만 교호작용의 경우 무시할 수 있는 경우가 많으며 이러한 경우에 사용되는 것이 일부실시법이다. 일부실시법은 무시할 수 있는 효과를 배제하고 실험함으로서 같은 인자수의 요인계획법에 비해 실험의 회수를 줄일 수 있다. 직교배열법은 일부실시법의 한 종류로서, $L_9(3^4)$는 3 수준계의 직교배열표(tables of orthogonal arrays)의 하나로 표 1 과 같다. $L_9(3^4)$의 경우 만약 교호작용과 오차가 무시되면 9 회의 실험에서 4 인자까지 배치가 가능하다.

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

	A	B	C	D
1	-1	-1	-1	-1
2	-1	0	0	0
3	-1	1	1	1
4	0	-1	0	1
5	0	0	1	-1
6	0	1	-1	0
7	1	-1	1	0
8	1	0	-1	1
9	1	1	0	-1

4. 실험

4.1 실험조건

직교배열법에 의한 선삭가공시 칩절단특성을 평가하기 위해 다음과 같은 실험을 행하였다.

절삭실험은 범용선반(국내, 광주남선선반㈜)을 이용하였으며, 절삭공구로는 CNMG120408 인서트를 사용하였으며, 공구홀더로는 PCLNR2525M12를 사용하였다. 피삭재로는 기계구조용 탄소강인 SM45C 를 사용하였다.

실험조건은 표 3에 나타낸 것과 같이 각각의 인자(절삭속도, 절삭깊이, 이송)당 3가지 수준으로 하였다. 또한 실험에 의한 오차를 줄이기 위해 임의의 순서로 실험을 행하였다.

Table 2 Lathe's specification

Spindle speed	17~1200rpm(12steps)
Feed rate	0.049~1.381mm/rev(40steps)
Power	10HP

Table 3 Cutting conditions

Cutting parameter	1	2	3
Cutting speed, V (m/min)	100	150	200
Feed rate, F (mm/rev)	0.10	0.20	0.30
Depth of cut, D(mm)	1.0	1.5	2.0

4.2 실험결과

표 4 는 칩절단지수, C_B를 구한 결과를 나타낸 것이다.

Table 4 The measured data of chip breaking index

	V	F	D	C_B
1	100	0.10	1.0	0
2	100	0.20	1.5	0.01955
3	100	0.30	2.0	0.10341
4	150	0.10	2.0	0
5	150	0.20	1.0	0
6	150	0.30	1.5	0.08532
7	200	0.10	1.5	0
8	200	0.20	2.0	0.0228
9	200	0.30	1.0	0

5. 해석

3개의 절삭인자들을 사용하여 회귀분석을 행하여 실험식을 구하였다. 실험식을 구하기 위해 사용된 모델식은 중선형회귀모형(multiple linear regression model, 중회귀모형)을 이용하였다. 식(4)는 칩절단성을 해석하기 위해 사용된 모델식이다.

$$C_B = \beta_0 v_1 + \beta_1 v_2 + \beta_2 f_1 + \beta_3 f_2 + \beta_4 d_1 + \beta_5 d_2 + \varepsilon \quad (4)$$

여기서 v_1은 절삭속도의 1차항(first-order), v_2는 2차항(second-order), f_1은 이송의 1차항, f_2는 2차항, d_1은 절삭깊이의 1차항, d_2는 2차항이며, β_0 ~ β_5는 중회귀분석을 통해 구해야 할 계수값들이다. 또 ε는 C_B를 측정할 때 발생하는 오차로서 $N(0,\sigma^2)$의 분포를 따르고, 오차항간에는 상호독립이라고 가정한다.

중회귀분석(multiple regression analysis)시 직교성을 유지하기 위해 인자들은 통계적 코딩(statistical coding)값으로 변환하였다. 변환식은 다음과 같다.

$$v_1 = \frac{Cutting\ speed - 150}{50} \quad (5)$$

$$v_2 = \left(\frac{Cutting\ speed - 150}{50}\right)^2 \quad (6)$$

$$f_1 = \frac{Feed\ rate - 0.2}{0.1} \quad (7)$$

$$f_2 = \left(\frac{Feed\ rate - 0.2}{0.1}\right)^2 \quad (8)$$

$$d_1 = \frac{Depth\ of\ cut - 1.5}{0.5} \quad (9)$$

$$d_2 = \left(\frac{Depth\ of\ cut - 1.5}{0.5}\right)^2 \quad (10)$$

표 5 는 실험결과를 이용하여 ANOVA 검정한 것이다. ANOVA 의 F-검정결과를 보면 유의수준이 82.77%으로 높음을 알 수 있다.

변환된 통계적 코딩값들을 이용하여 중선형회귀모형을 만들면 식(11)과 같다.

$$C_B = 0.031455 f_1 + 0.028550 f_2 - 0.016694 v_1 + 0.007067 v_2 + 0.021035 d_1 - 0.002710 d_2 \quad (11)$$

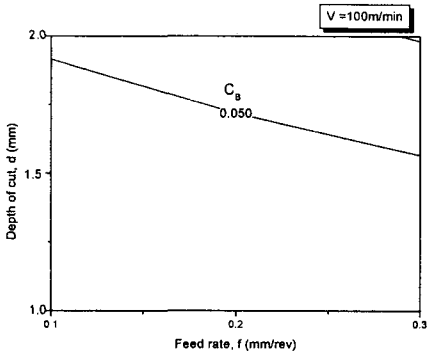
그리고 이 식의 결정계수(coefficient of determination), R^2 값을 구해보면 0.866 으로 높은 정도를 나타내고 있다.

그림2는 앞에서 구한 식(11)을 이용하여 일정

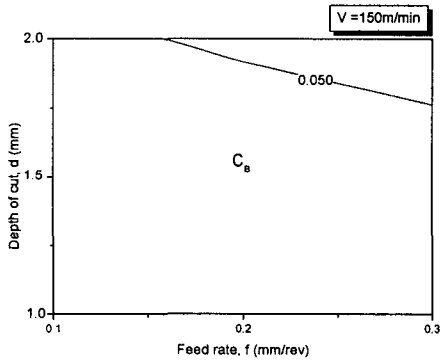
Table. 5 Analysis of variance (ANOVA)– Test

Factor	D.F	Sum of square	Mean square	F-value	Prob. > F-value
Model	6	0.01634	0.00272	3.222	0.1823
Error	3	0.00254	0.00085		
Total	9	0.01888			

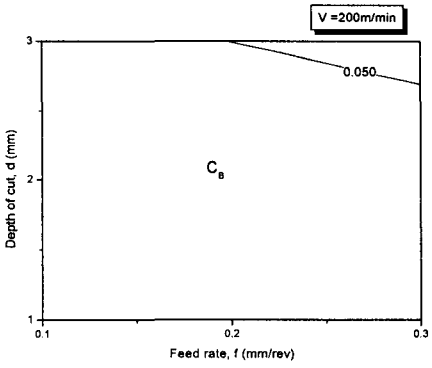
한 절삭속도에서의 C_B값을 나타낸 것이다.



(a) v=100m/min



(b) v=150m/min



(c) v=200m/min

Fig. 2 Chip breaking index, C_B using eqn.(10)

그림에 나타낸 것과 같이 속도가 증가할수록 동일한 이송과 절삭깊이에서 C_B값이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 속도가 증가할수록 칩의 두께가 감소하는 데서 기인하는 것으로 사료된다.

6. 결론

본 연구에서는 기존에 예측하기 힘들었던 칩 절단성을 칩절단지수, C_B를 이용하여 예측할 수 있는 실험식을 개발하여 칩절단특성을 평가하였다. 이를 위해 3^n부분실시법의 하나인 $L_9(3^4)$직교배열법을 이용하였다. 이 방법은 주로 인자들의 주효과만을 이용하여 식을 구할 때 쓰는 방법이다.

ANOVA의 F-검정결과 모델의 유의수준은 82.77%로 만족할 만한 수준이다. 또한 중회귀분석을 통해 구해진 실험식의 R^2값이 0.866으로 만족할 만한 수준이다.

앞으로 이와 같은 방법을 이용하여 칩절단예측식을 개발하여 이용할 경우 칩절단성을 예측할 수 있어 자동화, 무인화에 큰 도움이 될 것이다.

참고문헌

1. Nakayama, K., "A Study of the Chip Breaker," Trans. of JSME, Vol. 5, pp. 142～150., Vol. 34, No. 7, 1962.
2. Jawahir, I. S., "On the Controllability of Chip Breaking Cycles and Modes of Chip Breaking in Metal machining," Annals of the CIRP, Vol. 39/1, pp. 47～51, 1990.
3. 이영문, 최원식, 장승일, 허인호, "칩절단지수에 의한 칩절단특성 평가", 대한기계학회논문집 A 권, 제22권 제11호, pp. 1989～1997, 1998.
4. S. M. Wu, "Tool Life Testing by Response Surface Methodology, Part I & Part II," J. Eng. Ind., pp.105-116, 1964.
5. L. A. Choudhury, M. A. el-Baradle, "Surface Roughness Prediction in the Turning of High-Strength Steel by Factorial Design of Experiments," J. of

Materials Processing Technology, Vol. 67, pp.55-61, 1997.

6. W. H. Yang and Y. S. Tarng, "Design Optimization of Cutting Parameters for Turning Operations based on the Taguchi Mechod," J. of Material Processing Technology, Vol. 84, pp.122-129, 1998.