

평면 엔드밀의 최적 가공조건을 위한 실험계획법의 적용

이상재[#], 배효준^{*}, 서영백^{**}, 박흥식^{***}, 전태옥^{***}

Application of Design of Experiment Optimum Working Condition in Flat End-Milling

Sang-Jae Lee[#], Hyo-Jun Bae^{*}, Young-Baek Seo^{**}, Heung-Sik Park^{***}, Tae-Ok Jun^{***}

ABSTRACT

The End-milling has been widely used in the industrial world because it is effective to cutting working with various shape. Recently the end-milling is demanded the high-precise technique with good surface roughness and rapid manufacturing time for precision machine and electronic elements. The cutting working of end-milling such as, cutting direction, revolution of spindle, feed rate and depth of cut have an effect on optimum surface roughness. This study was carried out to decide the working condition for optimum surface roughness and rapid manufacturing time by design of experiment and ANOVA. From the results of this study, the optimum working condition for end milling is upward cutting in cutting direction, 600rpm in revolution of spindle, 240mm/min in feed rate, 2mm in axial depth of cut and 0.25mm in radial depth of cut. The design of experiment has become an useful method to select optimum working condition in end-milling.

Key Words : Taguchi Design (다구찌 기법), Feed Rate(이송속도), End-milling(엔드밀), Design of Experiment (실험계획법), ANOVA(분산분석)

1. 서 론

최근 산업현장에서 널리 사용되는 엔드밀 가공은 다양한 형상을 가진 재료의 가공에 유용하므로 그

수요는 날로 증가하고 있다. 엔드밀은 일반적으로 고속도강이나 초경재료를 원재료로 사용하고 있으며 코팅처리된 것을 사용하는 경우도 있다. 엔드밀 가공에 있어서 공구손상과 가공정도에 영향을 미치는 가공조건은 절삭속도, 이송속도, 절삭 깊이 등이 있다. 그러나 이들 절삭조건이 표면거칠기와 절삭온도에 어느 정도의 영향을 미치고 있는가에 대한 정량적인 상관관계에 관한 연구는 거의 이루어지지 않고 있는 실정에 있다. 이처럼 엔드밀 가공에 있어서 제

교신저자 동아대학교 대학원 기계공학과
E-mail lsj7700@hanmail.net

* 동아대학교 대학원 기계공학과

** 부산 인력개발원

*** 동아대학교 기계공학과

품의 정도에 영향을 미치는 표면거칠기와 공구수명에 영향을 미치는 절삭온도에 대한 최적의 절삭조건 선정이 우선되어야 한다고 생각된다^[1,2]. 그러나 최적의 절삭조건을 선정하기 위해서는 각 인자와 수준에 따른 실험은 많은 시간과 비용이 소요되므로 현실적으로 어려움이 따르므로 현재 다양한 분야에 적용되고 있는 다구찌 기법^[3~5]의 도입이 필요하게 된다. 다구찌 기법은 다양한 절삭조건에 대한 절삭 인자들의 상호관계를 수학적 모형을 수립할 수 있는 장점을 가지고 있으므로 엔드밀 가공시 표면거칠기에 미치는 절삭조건들의 상호관계를 추정할 수 있으리라 예상된다.

따라서 본 연구는 엔드밀 가공에 있어서 가공조건 즉, 절삭방향, 주축회전수, 공구 이송속도, 절삭깊이의 변화에 따른 표면거칠기를 실험계획법의 통계적인 방법으로 정량적 분석을 행하여 엔드밀의 최적의 가공조건을 선정하는 것을 목적으로 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험에 사용한 수직형 머시닝센터는 현대범용 M/C로서 주축의 회전수는 최고 10,000 rpm, 공구 이송속도는 1,000mm/min이다. Fig. 1은 수직형 머시닝센터의 사진을 나타내고 있으며, 절삭공구는 $\phi 10$ 의 고속도공구강 엔드밀을 사용하였다. 그리고 실험에 사용한 재료는 일반 기계구조용 탄소강인 SM45C를 35×25×25mm로 일정하게 가공하여 사용하였으며, 절삭깊이를 일정하게 하기 위하여 평면도가 0.01 mm 이하가 되도록 평면 연마하였다. 엔드밀의 평면가공에서 가공방향은 시험편의 가로방향 35mm를 기준으로 건식 측면 가공하였다.

Fig. 2에는 절삭온도 측정 시스템의 개략도를 나타내고 있으며 가공조건에 따른 절삭온도를 비교하기 위하여 절삭단면을 기준으로 0.5mm의 위치에 K-type 열전대(Thermocouple)를 이용하여 데이터 레코드(Data record)를 통하여 절삭온도를 PC로 저장하였다. 실험 완료 후 시험편은 표면 조도계를 사용하여 가공면의 표면거칠기 Ra를 측정하였다.

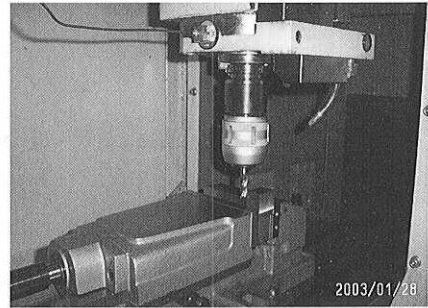


Fig. 1 Photo. of vertical machining center

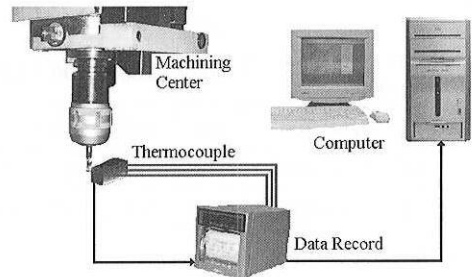


Fig. 2 Schematic diagram of temperature measurement

2.2 실험계획법의 적용

실험계획법에 의한 실험순서는 Fig. 3와 같다. 엔드밀 가공에 있어서 특성치라 할 수 있는 절삭온도와 표면거칠기에 가장 많은 영향을 미치는 가공조건 즉, 주축의 회전수, 이송속도, 절삭깊이, 공구 종류 등 여러 가지 인자들이 있다^[6]. 본 실험에서는 엔드밀 가공에 있어서는 정삭 가공에 대한 주축의 회전수, 이송속도, 절삭방향, 절삭깊이를 가공인자로 선정하였고, 실험에 사용된 머시닝센터의 가공 범위 내에서 각 인자는 4 수준으로 선정하였으며, 이를 Table 1에 나타내었다.

실험은 혼합-수준계 $L_{32}(2^1 \cdot 4^4)$ 직교배열표를 이용하여 실험계획을 수립하여 실험을 실시하였다. 엔드밀 가공에 있어서 가공조건에 따른 절삭온도와 표면거칠기 Ra값을 특성치로 설정하여 각 조건에 따른 통계적 분석을 위하여 분산분석(Analysis of variance)^[7~9]과 다구찌 기법을 활용하여 특성치에 대한 많은 영향을 주는 가공인자와 각 인자에 대한 최적의 가공조건을 분석하였다. 다구찌 기법에서 손실합수(S/N 비)를 이용하여 특성치에 대한 망소특성을 분석하였

고 손실함수는 식(1)과 같다

$$SN = -10 \log_{10} \sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n} \quad (1)$$

여기서 y 는 특성치(반응값), n 는 실험수를 나타내고 있다

Table 1 Experimental conditions

| Factor | Level | | | |
|---------------------------------|--------|----------|------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Cutting direction | Upward | Downward | | |
| Revolution of Spindle (rev/min) | 300 | 600 | 900 | 1,200 |
| Feed rate (mm/min) | 80 | 160 | 240 | 320 |
| Axial depth of cut (mm) | 2 | 4 | 6 | 8 |
| Radial depth of cut(mm) | 0.25 | 0.5 | 0.75 | 1.0 |

* rpm Revolution of Spindle
 Feed Feed rate
 Ad depth of cut for axial direction
 Rd depth of cut for radial direction

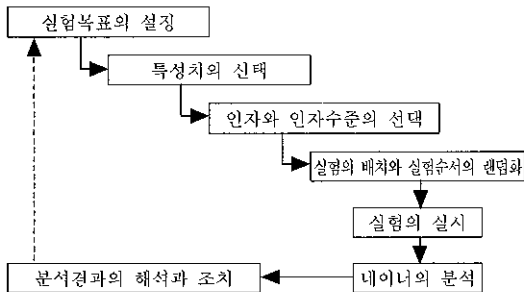


Fig. 3 Flow chart for Design of experiment

3. 실험결과 및 고찰

3.1 표준오차와 분산분석

3.1.1 표면거칠기

Fig 4는 엔드밀 가공조건에 따른 특성치인 표면거칠기에 대한 각 수준별 평균과 평균에 대한 신뢰구

간을 나타내고 있다 엔드밀의 가공인자인 절삭방향, 주축의 회전수 및 반지름 방향 절삭깊이에 따른 수준간의 차가 있는 것으로 나타나고 있으며 공구 이송속도와 축방향 절삭깊이에 따른 수준간의 차가 크지 않으며 수준내의 표준오차의 산포도 상당히 크다는 것을 알 수 있다 여기서 공구 이송속도가 240mm/min까지 표면거칠기는 비례적으로 감소하고 있고 320mm/min에서는 증가하고 있는 것은 전자의 경우는 절삭온도, 후자의 경우 절삭저항의 지배적인 영향을 받은 결과라 생각되어진다. 엔드밀 가공에 있어서 절삭방향은 상향가공일 때와 반지름 방향 절삭깊이는 적을수록 공구 1날당 절삭체적이 적어지므로 절삭온도와 진동 등과 같은 잡음인자의 영향이 적어 보다 안정적이 절삭가공이 이루어지며 주축 회전수의 변화에 따른 표면거칠기는 주축의 회전수가 600rpm에서 가장 안정적으로 나타나고 있는 것은 주축의 회전수가 600rpm 이하에서는 절삭량의 증가와 600rpm 이상에는 절삭온도의 상승으로 인하여 불안정한 절삭이 이루어지고 있다고 생각되어진다

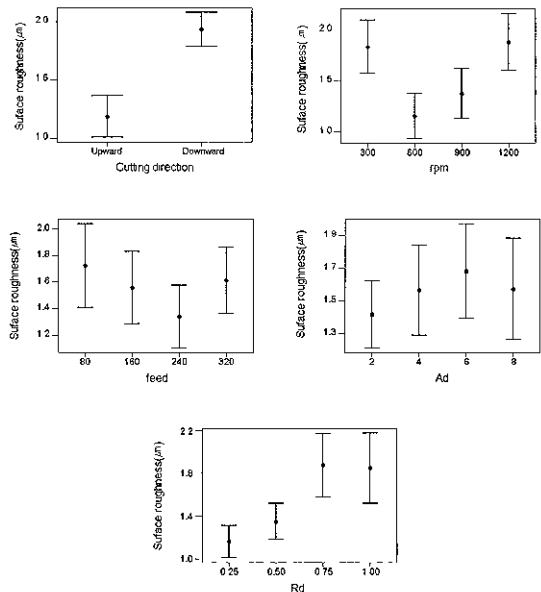


Fig. 4 Effect of factors on surface roughness(Ra)

Table 2는 가공인자에 대한 표면거칠기의 분산분석 결과를 나타내고 있으며 엔드밀 가공에서의 절삭

방향 가공인자가 수준에 따른 표면거칠기에 미치는 영향이 아주 크며 주축의 회전수와 반지름 방향 절삭깊이의 가공인자도 그 수준에 따라 많은 영향을 미치고 있다는 것을 볼 수 있다 그러나 공구 이송 속도와 축방향 절삭깊이의 가공인자는 그 수준변화에 따른 가공면의 표면거칠기에 영향이 적은 것으로 나타나고 있다 따라서 이의 결과로 엔드밀 가공에 있어서 피삭재의 양호한 표면거칠기를 위하여 많은 영향을 주고 있는 가공인자 즉, 절삭방향, 주축의 회전수 및 반지름 방향 절삭깊이에 대한 적절한 수준을 선택함으로써 보다 나은 표면거칠기를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

Table 2 ANOVA for surface roughness of factors

| Factor | S | ϕ | V | F_0 | P |
|-------------------|---------|--------|--------|-------|-------|
| Cutting direction | 4.4888 | 1 | 4 4888 | 14 39 | 0 001 |
| rpm | 2.9760 | 3 | 0 9920 | 3 18 | 0 049 |
| Feed | 0 6292 | 3 | 0 2097 | 0 67 | 0 580 |
| Ad | 0 2880 | 3 | 0 0960 | 0 31 | 0 819 |
| Rd | 3 1148 | 3 | 1 0383 | 3 33 | 0 043 |
| Error | 5 6142 | 18 | 0 3119 | | |
| Total | 17 1109 | 31 | | | |

3.1.2 절삭온도

Fig 5는 엔드밀 가공조건에 따른 특성치인 절삭온도에 대한 수준별 평균과 평균에서의 1표준오차까지 오차막대를 나타내고 있다 하향가공일 때와 주축의 회전수, 축방향 절삭깊이 및 반지름 방향 절삭깊이의 수준이 증가함에 따라 절삭온도는 증가하고 공구 이송속도의 수준 증가에 따라 감소하고 각 가공인자에 따른 그 수준간의 차가 나타나고 있다는 것을 볼 수 있으며 이들 가공인자들은 절삭온도에 많은 영향을 주고 있는 것을 알 수 있다 평면 엔드밀 가공시 절삭방향은 하향가공일 때가 초기 절삭량이 크고 주축 회전수의 수준이 증가하면 절삭저항이 증가하여 절삭온도는 상승하게 되고 축방향 절삭깊이, 반지름 방향 절삭깊이는 그 수준이 증가함에 따라 절삭체적이 비례적인 증가로 인하여 절삭온도는 증가하게 되고 공구 이송속도가 증가할수록 절삭체적이 증가에

따른 공구 1날당 절삭저항의 영향보다 공구 1날당 절삭횟수가 감소하므로 인한 영향으로 절삭온도는 감소하고 있다고 생각되어진다

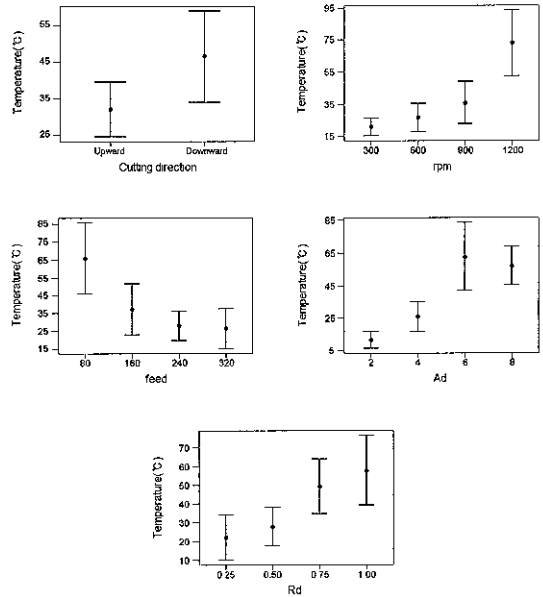


Fig. 5 Effect of factors with temperature

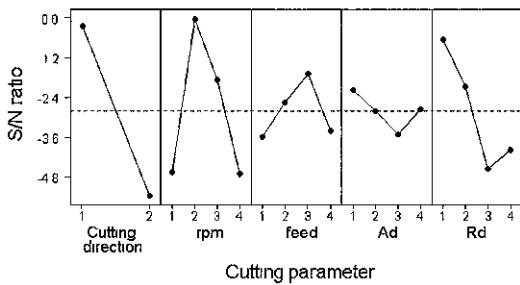
Table 3 ANOVA for cutting temperature of factors

| Factor | S | ϕ | V | F_0 | P |
|-------------------|---------|--------|--------|-------|-------|
| Cutting direction | 1661.8 | 1 | 1661.8 | 3.70 | 0 070 |
| rpm | 13253.0 | 3 | 4417 7 | 9 83 | 0 000 |
| Feed | 8080 6 | 3 | 2693.5 | 6 00 | 0 005 |
| Ad | 14713 6 | 3 | 4904 5 | 10 92 | 0 000 |
| Rd | 7067 0 | 3 | 2355 7 | 5 24 | 0 009 |
| Error | 8086 5 | 18 | 449 3 | | |
| Total | 52862 5 | 31 | | | |

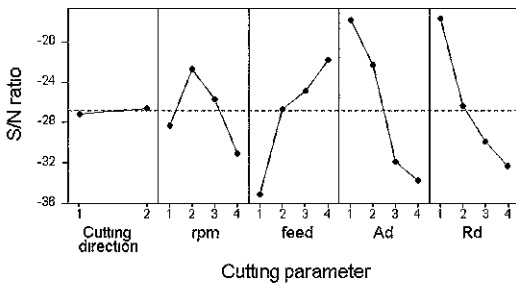
Table 3은 가공인자에 대한 절삭온도의 분산분석의 결과를 나타내고 있으며 엔드밀 가공에서의 가공인자인 주축의 회전수, 공구 이송속도, 축방향 절삭깊이 및 반지름 방향 절삭깊이는 절삭온도에 많은 영향을 미치고 있으며 절삭방향은 검정에서 유의하지 않은 것으로 나타나고 있지만 무시할 수 없는 인

자라 할 수 있다 따라서 평면 엔드밀 가공에서 본 실험에서 설정한 절삭방향을 제외한 모든 가공인자들은 절삭온도에 영향을 미치는 인자라고 생각되어지며 절삭온도가 상승하게 되면 공구의 수명단축과 표면거칠기에 영향을 주므로 각 인자의 주효과와 최적의 가공수준을 선정함으로써 보다 안정적인 절삭가공이 수행할 수 있을 것으로 생각되어진다

미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있다 또한 상향가공, 주축의 회전수는 600rpm, 공구 이송속도는 240mm/min, 축방향 절삭깊이는 2mm, 반지름 방향 절삭깊이는 0.25mm가 최적의 가공수준임을 알 수 있다 (b)는 절삭온도에 대한 가공인자들의 주효과로서 절삭방향을 제외한 나머지 가공인자들은 수준 변화에 따라 절삭온도에 주요한 영향을 주고 있다는 것을 알 수 있으며 하향가공, 주축의 회전수는 600rpm, 공구 이송속도는 320mm/min, 축방향 절삭깊이는 2mm, 반지름 방향 절삭깊이는 0.25mm가 최적의 가공수준임을 나타내고 있다 여기서 절삭방향과 공구 이송속도에 대한 최적수준의 차이를 나타내고 있으나 절삭방향은 절삭온도에 있어서 수준의 차이가 미소하고 표면거칠기에는 많은 영향을 주고 있으므로 상향가공이 최적의 가공조건이라 할 수 있고 공구 이송속도에 있어서도 절삭온도에 대한 영향보다는 표면거칠기에 대한 영향이 크므로 240mm/min 이 최적의 가공조건으로 생각된다.



(a) Surface roughness



(b) Cutting temperature

Fig. 6 Relation between S/N ratios and factors

3.2 주효과와 최적조건

Fig 6은 다구찌 기법을 활용하여 가공인자와 수준에 따른 명소특성을 식(1)를 이용하여 S/N비로 나타내고 있으며 엔드밀 가공에 있어서 가공인자의 특성치인 표면거칠기와 절삭온도에 대한 가공인자의 각 수준에 따른 주효과도 나타내고 있다 (a)는 표면거칠기에 대한 가공인자들의 주효과로서 절삭방향, 주축의 회전수, 반지름 방향 절삭깊이는 수준 변화에 따른 그 기울기 크게 나타나고 있으며 이는 공구 이송속도와 축방향 절삭깊이에 비하여 표면거칠기에

4. 결 론

고속도강 엔드밀을 이용한 피삭재(SM45C)의 평면 엔드밀 가공에 있어서의 가공인자에 대한 가공면의 표면거칠기와 절삭온도를 고려한 최적 가공조건을 실험계획법에 의한 분산분석과 다구찌 기법을 이용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다

1. 실험계획법을 통한 평면 엔드밀 가공에서 최소의 실험을 통하여 가공인자들에 대한 통계적 분석이 가능하였다
2. 분산분석과 S/N비를 통하여 평면 엔드밀 가공시 표면거칠기는 절삭방향, 주축의 회전수, 반지름 방향 절삭깊이 순으로 영향을 미친다.
3. 절삭온도는 축방향 절삭깊이, 반지름 방향 절삭깊이, 공구 이송속도, 주축의 회전수 순으로 영향을 미친다
4. 상향절삭, 주축의 회전수는 600rpm, 공구이송속도는 240mm/min일 때와 절삭깊이는 적을수록 표면 거칠기와 절삭온도를 고려한 최적의 가공조건임을 알 수 있었다

참고문헌

- 1 M A Elbestawi, F. Ismail, K M Yuen, "Surface Topography Characterization in Finish Milling" Int J Mach Tools Manufact, Vol 34, No 2, pp 245-255, 1994
- 2 F Ismail, M. A Elbestawi, "Generation of Milled Surfaces Including Tool Dynamics and Wear" , ASME J. of Eng. for Ind, Vol 115, pp 245-252, 1993.
- 3 品質評價를 위한 S/N比 品質 工學 講座 3. 日本規格協會
4. 박성현, "현대실험계획법", 민영사, 2002
- 5 이상복, "알기쉬운 다구찌기법", 상조사, 2001
- 6 R E Bechhofer and C W Dunnett, "Percentage points of multivariate Student t distributions," Selected Tables in Mathematical Studies, Vol 11 American Mathematical Society, Providence, RI 1988.
- 7 M B Brown and A B. Forsythe, "Journal of the American Statistical Association", 69, pp 364-367, 1974.
- 8 H. L. Harter, "Order Statistics and Their Uses in Testing and Estimation", Vol 1 US Government Printing Office, Washington, D.C. 1970
- 9 A J Hayter, "A proof of the conjecture that the Tukey-Kramer multiple comparisons procedure is conservative," Annals of Statistics, 12, pp. 61-75 1984