

## 기계구조용 탄소강(SM45C)의 단속절삭 시 절삭력에측을 위한 회귀방정식 도출

배명일\*, 이이선\*\*,#

\*충남대학교 기계·금속공학교육과, \*\*BM Works

### Regression Equation Deduction for Cutting Force Prediction during Interrupted Cutting of Carbon Steel for Machine Structure (SM45C)

Myung-Il Bae\*, Yi-Seon Rhie\*\*,#

\*Department of Mechanical & Metallurgical Engineering Education, Chung-nam National Univ.,

\*\*BM Works.

(Received 11 April 2016; received in revised form 29 April 2016; accepted 2 May 2016)

#### ABSTRACT

Interrupted cutting has different cutting characteristics compared with continuous cutting. In interrupted cutting, the workpiece has a groove that regularly impacts the cutting tool and workpiece. Therefore, tool damage occurs rapidly, and this increases the cutting force and surface roughness. In this study, we performed interrupted cutting of carbon steel for machine structure (SM45C) using a coated carbide tool (TT7100). To predict the cutting force, we analyzed the experimental results with a regression analysis. The results were as follows: We confirmed that the factors affecting the principal force and radial force were cutting speed, depth of cut, and feed rate. From the multi-regression analysis, we deduced regression equations, and their coefficients of determination were 89.6, 89.27, and 28.27 for the principal, radial, and feed forces, respectively. This means that the regression equations were significant for the principal and radial forces but not for the feed force.

**Key Words :** Carbon Steel for Machine Structure(SM45C), Regression Equation(회귀방정식), Cutting Force(절삭력), Coated Carbide Tool(피복초경공구)

#### 1. 서론

기계부품의 제작공정에서 생산기술의 중추적인 역할을 담당하고 있는 절삭가공법은 가장 경제적으로 정밀도를 확보할 수 있는 가공법으로 대부분 공작물과 공구의 접촉이 연속으로 이루어지는 특징을 가지고 있으며 이로 인하여 절삭공구나 공작

물에 가해지는 충격은 발생하지 않는다<sup>[1-3]</sup>. 하지만 단속절삭에서는 공작물이 흠을 가지고 있기 때문에 절삭시 공구와 공작물이 일시적으로 접촉하였다가 분리되므로 공구와 공작물 사이에 발생하는 힘이 주기적으로 변화하게 된다. 공작물에 가해지는 힘의 주기적 변화는 단속 절삭시 칩핑(chipping)등의 공구파손현상이 연속절삭에 비하여 심하게 일어나는 원인을 제공하고 있으며 절삭력과 표면 거칠기를 증가시키는 원인이 되고 있다<sup>[4-7]</sup>.

# Corresponding Author : ysrhie@gmail.com

Tel: +82-42-581-2239, Fax: +82-42-581-2295

이전 연구에서는 피복초경공구를 이용하여 기계구조용 탄소강(SM45C)을 단속절삭을 실시하여 표면 거칠기에 가장 큰 영향을 미치는 인자가 이송율이라는 것을 확인하였다<sup>[1]</sup>.

본 연구에서는 이전 연구에서 다루지 못하였던 기계구조용 탄소강의 단속절삭가공에 영향을 미치는 인자인 절삭깊이, 이송율, 절삭속도를 대상으로 단속절삭 가공시 획득한 절삭력을 이용하여 회귀 분석을 실시하고 절삭력을 예측하고자 한다. 이를 위하여 실험계획법을 적용하였으며, 예비 실험을 실시한 후 실험에 이용할 인자의 수준을 정하였다. 그리고 실험계획법의 직교 배열표에 의한 실험을 실시하였으며, 실험으로부터 얻은 결과의 분산분석 및 신뢰구간 분석을 통하여 기계구조용 탄소강의 단속절삭시 절삭력에 영향을 주는 인자를 도출하였고 회귀 분석을 통하여 절삭력 예측을 위한 회귀방정식을 도출하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

실험에 사용된 선반은 (주)화천기계의 HL 460×1000GN이다. 실험 중 시험편의 흔들림을 방지하기 위하여 주축에 시험편을 고정한 후 심압대를 이용하여 고정하였다. Fig. 1은 본 실험에 사용된 실험장치의 개략도를 나타내고 있다.

Fig. 1에 나타낸바와 같이 실험에 사용된 공구 동력계는 Kistler 9257A 이며 절삭실험 중 공구동력계에 입력되어 출력되는 절삭력 신호는 Kistler 5019 증폭기에서 증폭되고, A/D변환기를 거쳐 PC에 저장된다.

Fig. 2는 실험에 사용된 시험편의 형상을 나타내고 있다. 시험편은 500mm 길이의  $\varnothing 49.95$ ,  $\varnothing 44.85$ ,  $\varnothing 37.84$  시험편을 CNC가공하여 준비하였다. 각 시험편당 20mm길이의 단을 19개 가공하였다. 단과 단사이의 거리는 4mm이며, 단속절삭을 위하여 깊이5mm, 폭10mm의 홈을 가공하였다.

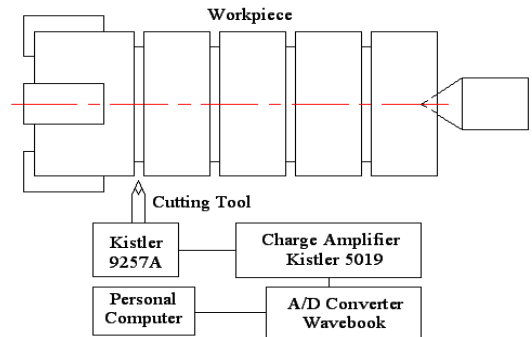


Fig. 1 Experimental setup

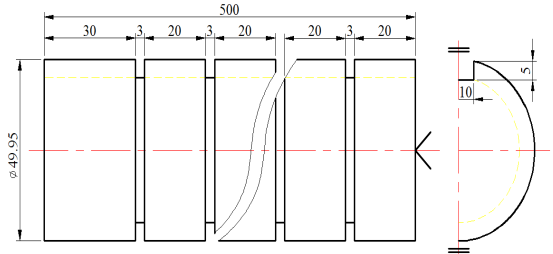


Fig. 2 Shape of specimen

### 2.2 실험방법

본 연구의 실험조건 선정은 실험계획법을 이용하였다<sup>[8]</sup>.

실험계획법의 적용을 위하여 예비실험을 실시하였으며 Table 1은 결정된 인자의 순위 및 수준을 나타내었다.

실험은 3수준 3인자를 갖추었으며 A, B, C인자의 교호작용을 무시한 L9(3<sup>3</sup>)직교배열표를 사용하였다. Table 2는 본 실험에 사용된 직교배열표를 나타내고 있다.

Table 1 Factors and levers used in experiment

Sign	Factors	Levels		
		0	1	2
A	Feed rate(mm/rev)	0.066	0.105	0.157
B	Depth of cut (mm)	0.1	0.2	0.3
C	Cutting speed(m/min)	120	100	80

**Table 2 Orthogonal array table for L9(3<sup>3</sup>)**

Expt. No.	Column Number		
	1	2	3
1	0	0	0
2	0	1	1
3	0	2	2
4	1	0	1
5	1	1	2
6	1	2	0
7	2	0	2
8	2	1	1
9	2	2	0
Factor Assigned	A	B	C

### 3. 실험결과 및 고찰

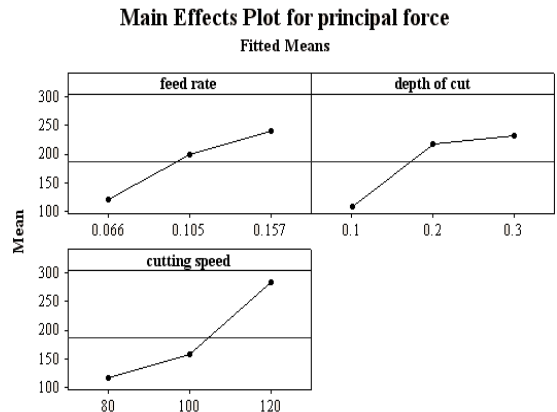
#### 3.1 주분력(Principal force)

Table 3은 Table 2의 실험조건을 이용하여 실험을 실시한 후 측정된 주분력을 분산 분석한 결과이다.

Table 3의 분산분석에 나타난 바와 같이 이송율의 분산 값은 11095, 절삭깊이의 분산 값은 13526, 절삭속도의 분산 값은 22907을 나타내고 있다. 분산 값의 경우 절삭속도가 가장 크고 절삭깊이와 이송율의 경우 절삭깊이의 절반정도의 값을 가지고 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 F0값을 살펴보면 이송율의 경우 201.32, 절삭깊이의 경우 245.43, 절삭속도의 경우 415.65를 나타내고 있다. F0값의 경우에도 절삭속도의 값이 가장 크고 절삭깊이와 이송율의 약 2배 정도를 나타내고 있다는 것을 알 수 있다. P검정 값의 경우 절삭속도는 0.002, 절삭깊이는 0.004, 이송율은 0.005를 나타내고 있다.

**Table 3 ANOVA table of principal force**

Factors	DF	S	V	F0	P
feed rate	2	22190	11095	201.32	0.005
depth of cut	2	27052	13526	245.43	0.004
cutting speed	2	45814	22907	415.65	0.002
Error	2	110	55		
Total	8	95166			



**Fig. 3 Main effects plot for principal force**

주분력의 분산분석 결과 피복초경공구를 이용하여 기계구조용 탄소강을 단속절삭 가공하는 경우 주분력에 가장 많은 영향을 미치는 인자는 절삭속도, 절삭깊이, 이송율이라는 것을 알 있다.

Fig. 3은 주분력에 영향을 미치는 인자인 이송율, 절삭깊이, 절삭속도에 대하여 주효과 분석을 실시한 것이다. 이송율, 절삭깊이, 절삭속도 모두 양의 상관관계가 있음을 보여주고 있다. 이는 이송율 절삭깊이, 절삭속도의 증가가 주분력의 변화에 밀접한 관계가 있다는 것을 나타내고 있다. 그리고 이송율, 절삭깊이, 절삭속도의 증가에 따라 절삭력이 증가할 것이라는 것을 나타내고 있다.

다음의 식 (1)은 피복초경공구를 이용하여 기계구조용 탄소강을 단속절삭한 후 얻은 주분력을 중회귀 분석하여 얻은 회귀방정식이다.

$$P.F.= -495 + 1287F + 613D + 4.18C \quad (1)$$

여기서 F는 이송율(mm/rev), D는 절삭깊이(mm), C는 절삭속도(m/min)를 나타내고 있다.

Table 4는 식 (1)에 나타난 회귀방정식의 정도를 알아보기 위한 분산분석표이다. Table 4에서 나타난 바와 같이 F0의 값은 14.36이고 P 검정 값은 0.007로서 식(1)의 회귀방정식은 정도가 높음을 알 수 있다. 그리고 결정계수 R<sup>2</sup>값은 89.6을 나타내고 있다. 이것은 총 변동에서 회귀변동이 차지하는 비율이 89.6%임을 나타내고 있다.

**Table 4 ANOVA table of multiple regression model**

Factors	DF	S	V	F0	P
Regression	3	85272	28424	14.36	0.007
Residual	5	9894	1979		
Total	8	95166			

**Table 5 ANOVA table of radial force**

Factors	DF	S	V	F0	P
feed rate	2	9276.2	4538.1	313.86	0.003
depth of cut	2	6049.6	3024.8	204.68	0.005
cutting speed	2	11210.9	5605.4	379.32	0.003
Error	2	29.6	14.8		
Total	8	26566.2			

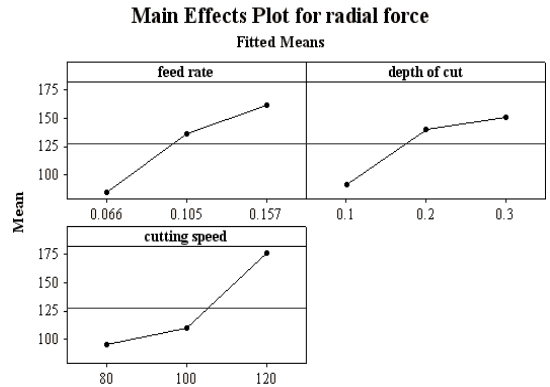
### 3.2 배분력(Radial force)

Table 5는 Table 3의 실험조건을 이용하여 실험을 실시한 후 얻은 배분력을 분산 분석한 결과이다.

배분력을 분산 분석한 경우 절삭속도의 분산 값은 5606.4, 이송율의 분산 값은 4538.1, 절삭깊이의 분산 값은 3024.8로 절삭속도, 이송율, 절삭깊이의 순으로 값이 작아지는 것으로 나타났다. F0값의 경우 절삭속도 379.32, 이송율 313.86, 절삭깊이 204.68로 나타났다. P검정 값은 절삭속도와 이송율이 0.003 절삭깊이가 0.005를 나타내고 있다. 배분력의 분산분석결과 피복초경공구를 이용하여 기계 구조용 탄소강을 단속 절삭하는 경우 배분력에 영향을 미치는 인자는 절삭속도, 이송속도, 절삭깊이라는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 배분력 영향을 미치는 인자인 이송율, 절삭깊이, 절삭속도에 대하여 주효과 분석을 실시한 것이다. 주분력의 주효과 분석과 마찬가지로 배분력에서도 이송율, 절삭깊이, 절삭속도의 인자가 모두 양의 상관관계가 있음을 보여주고 있다. 이는 이송율 절삭깊이, 절삭속도의 증가가 주분력의 변화에 밀접한 관계가 있다는 것을 나타낸다.

다음의 식 (2)는 피복초경공구를 이용하여 기계 구조용 탄소강을 단속절삭한 후 얻은 배분력을 중회귀 분석하여 얻은 회귀방정식이다.



**Fig. 4 Main effects plot for radial force**

**Table 6 ANOVA table of multiple regression model**

Factors	DF	S	V	F0	P
Regression	3	23715.4	7905.13	13.835	0.007
Residual	5	2850.8	570.17		
Total	8	26566.2			

$$R.F. = -225.038 + 826.057F + 298.333D + 2.025C \quad (2)$$

추정된 회귀방정식은 Table 6에서 살펴보면 F0의 값이 13.835이고 P검정 값은 0.007을 나타내고 있으며 회귀방정식의 정도가 높다는 것을 알 수 있다. 결정계수  $R^2$ 을 계산해 보면 89.27로 총 변동에서 회귀변동이 차지하는 비율이 89.27%이며 추정된 회귀방정식의 정도가 높다는 것을 알 수 있다.

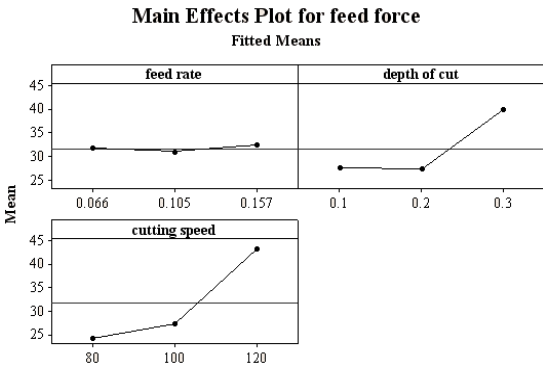
### 3.3 이송분력(Feed force)

Table 7은 Table 2의 실험조건을 이용하여 실험을 실시한 후 측정된 이송분력을 분산 분석하여 나타낸 것이다. 절삭속도의 분산 값은 313, 절삭깊이의 분산 값은 156.3이며 이송율의 분산 값은 1을 나타내고 있다. F0값의 경우 절삭속도가 0.35, 절삭깊이가 0.18, 이송율이 1의 값을 나타내고 있다. P검정 값의 경우 절삭속도는 0.74, 절삭깊이는 0.85, 이송율은 0.99의 값을 나타내고 있다.

이송분력의 분산분석에서 이송율의 P검정 값은 1에 가까운 값을 나타내고 있다. 또한 절삭깊이와

**Table 7 ANOVA table of feed force**

Factors	DF	S	V	F0	P
feed rate	2	2.7	1	1	0.99
depth of cut	2	312.7	156.3	0.18	0.85
cutting speed	2	626	313	0.35	0.74
Error	2	1784.7	892.3		
Total	8	2726			



**Fig. 5 Main effects plot for feed force**

절삭속도 또한 매우 큰 값을 나타내고 있다. 이것은 이송분력, 절삭깊이, 절삭속도는 이송분력에 미치는 영향이 매우 적다는 것을 나타낸다.

Fig. 5는 이송분력에 영향을 미치는 인자인 이송율, 절삭깊이, 절삭속도에 대하여 주효과 분석을 실시한 것이다. 이송율의 경우 이송율의 증가에 따라 수평관계임을 나타내고 있으며, 절삭속도와 절삭깊이는 양의 상관관계가 있음을 나타내고 있다. 이것은 절삭깊이와 절삭속도의 증가가 이송분력의 변화와 관계가 있다는 것을 나타내고 있으며 이송율의 증가는 이송분력에 미치는 영향이 작다는 것을 나타내고 있다.

다음의 식 (3)은 피복초경공구를 이용하여 기계구조용 탄소강을 단속절삭한 후 얻은 이송분력의 회귀방정식이다.

$$F.F. = -29.0759 + 8.31601F + 61.6667D + 0.475C \quad (3)$$

추정된 회귀방정식은 Table 8에서 살펴보면 F0의 값이 0.6567이고 P검정 값은 0.613으로 회귀방정식

**Table 8 ANOVA table of multiple regression model**

Factors	DF	S	V	F0	P
Regression	3	770.53	256.844	0.6567	0.613
Residual	5	1955.47	391.094		
Total	8	2726			

의 정도가 낮다는 있다는 것을 알 수 있다. 이는 이송분력을 분석하여 추정된 회귀방정식으로는 이송분력을 정확하게 예측하기 어렵다는 것을 나타내고 있다. 추정된 회귀방정식의 결정계수  $R^2$ 을 계산해 보면 28.27로 총 변동에서 회귀변동이 차지하는 비율이 28.27%이라는 것을 나타낸다.

주분력, 배분력, 이송분력에 대한 분산 값의 크기는 이송분력이 가장 작은 값을 나타내고 있으며, F0값의 경우에도 이송분력이 가장 작은 값을 나타내고 있다. 그리고 P검정 값을 비교해보면 이송분력의 경우 P검정 값이 주분력과 배분력에 비하여 매우 크게 나타나고 있다는 것을 알 수 있다. 이는 피복초경공구를 이용하여 기계 구조용 탄소강을 단속 절삭하는 경우 절삭속도, 이송율, 절삭깊이의 인자가 이송분력에는 그리 큰 영향을 미치지 않다고 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 피복초경공구를 이용하여 기계구조용 탄소강을 단속 절삭하였고, 절삭력을 예측하기 위하여 실험결과를 중 회귀 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 회귀분석을 통하여 기계구조용 탄소강의 단속 절삭시 절삭력을 예측할 수 있는 회귀방정식을 도출하였다
- 주분력과 배분력에 영향을 주는 인자는 절삭속도, 절삭깊이, 이송율인 것으로 확인할 수 있었다.
- 절삭력을 중 회귀 분석하여 회귀방정식을 도출하였으며, 주분력의 결정계수  $R^2$ 은 89.6, 배분력의 결정계수  $R^2$ 은 89.27을 얻었으며, 총 변동에서 회귀변동이 차지하는 비율이 주분력의

- 경우 89.6%, 배분력의 경우 89.27%로 회귀방정식의 정도가 높다는 것을 확인할 수 있었다.
4. 이송분력의 경우 결정계수  $R^2$ 은 28.27로 총 변동에서 회귀변동이 차지하는 비율이 28.27%로 낮게 나타남을 확인할 수 있었다.

8. S. H. Park., Modern Design of Experiments, Ming Young Sa, pp. 423-496, 1996

## REFERENCES

1. Bae, M. I. and Rhie, Y. S., "Surface Roughness Prediction of Interrupted Cutting in SM45C Using Coated Tool", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 13, No. 3, pp.. 77-82, 2014
2. Kim, S. H. and Cho, H. D. and Kim, T. H., "Cycle Reduction Simulation for Turning Process", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 1, pp. 1-8, 2015
3. Ahn, K. W. and Jeon, E. C. and Kim, T. H., "Turning Machining Optimization using Software Based on Cutting Force Model", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 5, pp.. 107-112, 2015
4. De Godoy, V. A. A., and Diniz, A. E., "Turning of interrupted and continuous hardened steel surface using ceramic and CBN cutting tools", Journal of Material Processing Technology, Vol. 211, Mo. 6, pp. 1014-1025, 2011
5. Pavel, R., Marinescu, I., Deis, M., and Pillar, J., "Effect of tool wear on surface finish for a case of continuous and interrupted hard turning", Journal of Material Processing Technology, Vol. 170, No. 1, pp. 341-349, 2005
6. Lee, B. C. and Kang, I. S., "Machinability Evaluation of Interrupted Cutting in SCM420 Steel by Using Coated and Uncoated Tool", KSMPE proceeding '04, pp.82-87, 2004
7. Kim, D. W. and Cho, Y. J., "Wear of Partially Coated Tool in Interrupted Cutting", KSPE proceeding '95, pp. 67-72, 1995.