

# 볼 엔드밀에 의한 경사면 상방향 절삭가공에 관한 연구

정진우\*, 배은진\*\*, 김상현\*, 왕덕현\*\*\*.#

\*경남대학교 대학원 기계융합공학과, \*\*경남대학교 산업대학원 기계공학과, \*\*\*경남대학교 기계공학부

## Study on Upward Machining of Inclined Surface by Ball-End Milling

Jin-Woo Jeong\*, Eun-Jin Bae\*\*, Sang Hyun Kim\*, Duck Hyun Wang\*\*\*.#

\*Graduate School, Kyungnam Univ., \*\*Graduate School of Industry, Kyungnam Univ.,

\*\*\*School of Mechanical Engineering, Kyungnam Univ.

(Received 11 December 2020; received in revised form 29 December 2020; accepted 31 December 2020)

### ABSTRACT

The mold industry is competitive, and mold should be processed under optimal conditions for efficient processing. However, the cutting conditions of the ball-end mill, which are a major factor in mold processing, are mostly set empirically, and considerable research is required for increasing the tool life and processing accuracy. In this study, a tool dynamometer and an eddy current sensor were used along with NI-DAQ, a data acquisition device, to obtain characteristic values of the cutting force and tool deformation during the ball end-mill machining of inclined surfaces at a machining center. The cutting force and tool deformation were measured in an experiment. It was found that the tool received the greatest cutting force at the end of the machining process, and the deformation of the tool increased rapidly. Furthermore, the cutting force tended to increase with the angle and number of rotations. The deformation increased rapidly during the machining of a 45° inclined surface.

**Key Words** : Upward Cutting(상향가공), Ball-end Milling(볼 엔드밀), Inclined Surface(경사면), Tool Dynamometer(공구동력계), Eddy Current Sensor(와전류센서)

### 1. 서 론

현재 우리나라의 금형 산업은 대량생산을 지원하기 위한 기반산업이지만 자동차, 가전제품, 완구류 등 제품의 모델 수명이 짧아짐에 따라 금형도 주문생산, 다품종 소량생산 방식으로 변화하고 있다. 금형산업이 경쟁력 있고, 효율적 금형가공을 위해서는 최적의 조건에 따라 가공해야 하나 금형가공에서 주로 사용하는 볼 엔드밀의 절삭조건은 경

험적으로 설정되는 것이 대부분으로 공구수명 및 가공정도 측면에서 아직 많은 연구가 필요하다. 3차원 자유곡면을 가진 금형을 절삭할 때는 경사진 각도에 따라 볼 엔드밀에 작용 하는 절삭부위가 달라 절삭력의 변동으로 인하여 공구가 손상되기 쉽고 절삭특성의 변화가 심하게 일어난다.

그러므로 고속 가공에서 공구수명을 향상시키고 표면형상정도 및 표면 거칠기를 높이기 위해서는 적절한 공구경로의 선정과 이에 따른 절삭특성을 파악하여 최적의 가공조건을 설정하는 것이 중요하다. Kim 등<sup>[1]</sup>은 볼 엔드밀 공구에 의한 사각형상 가공 시 공구 휨에 따른 절삭력 특성에 관한 연구

# Corresponding Author : chan5878@naver.com

Tel: +82-55-292-4000, Fax: +82-55-293-4400

를 하였고, Cho 등<sup>[2]</sup>는 볼 엔드밀 가공에서의 공구 처짐 예측과 정밀 가공에 관한 연구를 하였고, Park 등<sup>[3]</sup>은 볼 엔드밀에 의한 곡면 가공의 절삭력 예측에 관한 연구를 실시하였다.

본 연구에서는 머시닝센터에서 경사면의 볼 엔드밀 가공 시 절삭력특성과 공구변형 특성을 파악하고자 3축의 절삭저항을 측정 위해 공구동력계(Tool Dynamometer)와 경사 방향인 X축 방향의 공구 변형을 측정하기 위해서 와전류센서(Eddy Current Sensor)를 데이터 취득장비인 NI-DAQ에서 계측프로그램인 LabVIEW프로그램으로 절삭력과 공구변형량을 측정하고자 한다.

## 2. 실험장치와 방법

### 2.1 실험 장치의 구성

볼 엔드밀 가공 중에 발생하는 공구의 변형량과 공구동력계로부터 절삭력을 측정하기 위한 실험 장치를 Fig. 1에 나타낸 것처럼 두산 Mynx 6500 수직형 머시닝센터에서 실험을 수행하였다.

공구동력계는 머시닝센터 테이블위에 설치하여 분력을 측정하였으며 와전류센서는 주축스핀들 측면에 치공구를 설치하고 X축 방향에서 측정할 수 있도록 하였다. 경사면의 볼 엔드밀 가공 시 공구의 변형에 따른 와전류 센서 신호와 절삭력의 특성 변화를 관찰하였으며, 공구 변형의 점진적 증가에 따른 절삭력 (Cutting force)과 공구변형 (Tool deformation)을 알아보았으며, 절삭력의 크기와 볼 엔드밀 가공조건을 찾아 가공인자와 수준의 변화에 따른 어떤 상관관계가 있는지를 연구하였다.<sup>[4]</sup>

와전류센서는 주축부에 치공로 고정하고 X축의 변위를 측정하기 위하여 와전류센서 고정 장치를 설치하고 공구끝단으로부터 75mm 되는 부분에 측정 기구(Measuring fixtures)를 볼 엔드밀 샹크(Shank)부에 부착하고 측정기구와 와전류센서 사이의 간격을 0.5mm 간격을 두고 설치했다.

와전류 센서와 공구동력계에서 측정된 신호는 컨트롤러와 프리앰프를 거쳐 입력된 신호는 NI-DAQ board(U.S.A)에서 A/D 변환되어 PC에 LabVIEW(U.S.A)프로그램을 이용하여 저장하였다. 실험에 사용한 장치의 사진을 Fig. 2에 나타내었다.

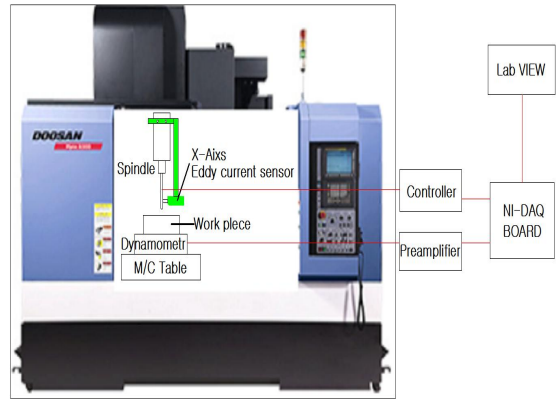


Fig. 1 Schematic illustration of experimental system

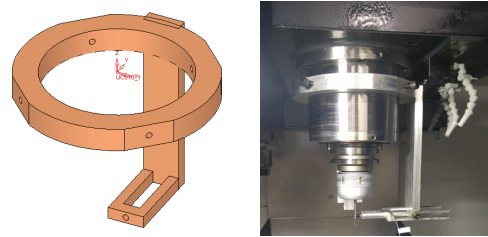
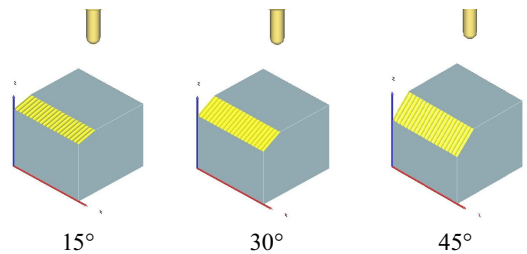
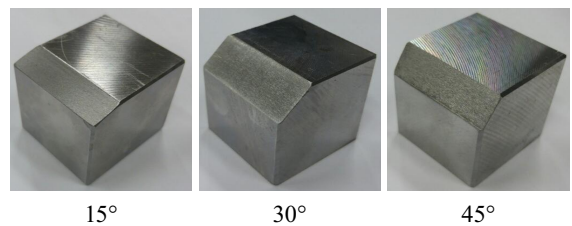


Fig. 2 3D modeling of jig for eddy current sensor and its photograph



(a) CATIA modeling for different inclined surfaces



(b) Machined surfaces for different inclined angles

Fig. 3 3D modeling and machined surface for different inclined angles

경사면을 가공하기 CATIA를 사용하여 Fig. 3(a)와 같이 모델링하고 CAM소프트웨어인 Power Mill을 이용해 가공방법과 가공조건에 대한 모의가공을 통해서 검증한 후 수치제어(NC) 코드를 생성하였으며 피삭재의 가공형상 사진을 Fig. 3(b)에 나타내었다.

피삭재에 경사면에 대한 절삭력 신호처리는 실험과 동시에 공구동력계와 공구변형량은 와전류센서로 부터의 미소전압 변동량을 전압증폭기를 통하여 증폭되고 NI-DAQ board(USA)에서 A/D변환되어 컴퓨터에 내장되어 있는 LabVIEW 프로그램을 통해서 저장하여 분석하였으며, LabVIEW 프로그램을 이용하여 1초당 1000개의 데이터를 획득하는 방법으로 컴퓨터에 저장하여 분석하였다. Fig. 4는 실험 데이터를 저장한 LabVIEW 프로그램의 프론트 패널(front panel)을 나타낸 것이다.

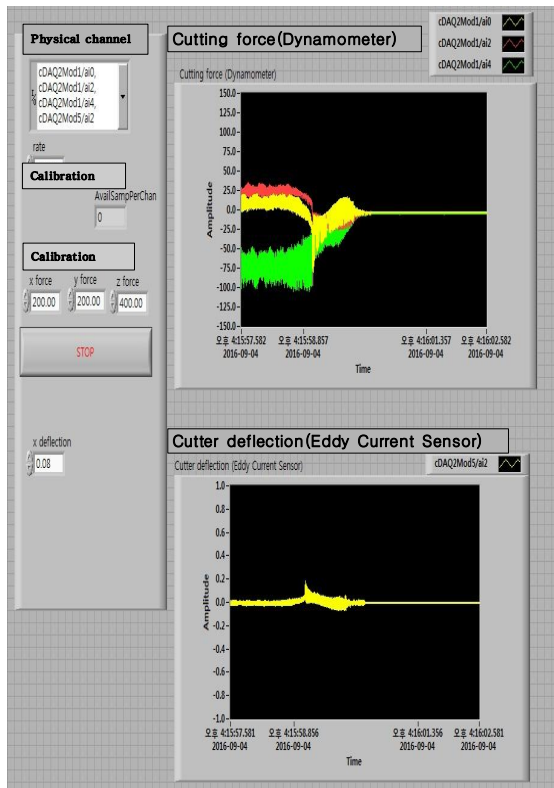


Fig. 4 LabVIEW program for measuring 3-directional cutting forces and 1-directional tool deflection

## 2.2 피삭재 및 공구의 특성

본 실험에 사용된 SM45C 기계구조용 탄소강은 산업현장에서 많이 사용하고 있는 비교적 강도가 요구되는 볼트, 너트, 끼워 넣는 볼트, 베어링류 외에 크랭크축, 액슬 샤프트, 연접봉, 키, 핀 등에 이용 사용되고 있으며, 아울러 열처리나 경화 처리를 하여 기계적 강도가 요구되는 부품에 사용되고 있다.

본 실험에서 사용된 시편의 가공은 범용 수직 밀링기에서 페이스 커터로 40mm×40mm×35mm의 가공한 후 경사면은 머시닝센터에서 가공하였다.

절삭공구로는 공구마멸에 인한 가공오차를 최소화하기 위하여 고속가공 및 형상가공에 적합한 고내마멸성을 가진 TiCN(Titanium carbon nitride) 코팅된 HSS(SKH 59)에 코발트 8%가 함유된 직경 6mm 공구를 사용하였다. 피삭재의 화학적 조성을 각각 Table 1에 나타내었으며, Fig. 5는 가공후의 시편 모습이다.

Table 1 Chemical composition of SM45C

Chemical composition (%)					
C	Si	Mn	P	S	Fe
0.40~0.5	0.15~0.4	0.40~0.8	0.045	0.045	bal.



(a) 15°



(b) 30°



(c) 45°

Fig. 5 Photographs of machined specimens

### 2.3 실험 조건 및 실험 방법

실험을 어떻게 행하고, 데이터를 어떻게 취하며, 어떠한 통계적 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 실험회수에서 최대의 정보를 얻기 위하여 실험계획법을 활용하였다. 본 연구에서는 실험계획에서 많이 사용되는 분석방법인 분산분석(Analysis of Variance)인 ANOVA 분석을 사용하였다. 실험에서 분산분석을 위하여 인자(Factor)와 인자수준(Level)의 선택, 실험의 배치와 실험순서의 순서화, 실험의 실시, 데이터의 분석, 그리고 마지막으로 분석결과의 해석과 조치의 순으로 실시하였으며 Table 2는 인자가 3개이고, 수준이 3개이며 27회의 상방향 절삭 가공실험, 같은 인자, 수준으로 요인들을 검출하기 위한 방법인 실험배치로 2번의 L27 (3<sup>3</sup>)형 직교배열표를 사용하였다.

**Table 2 Orthogonal array of 3 factors and 3 levels L27 (3<sup>3</sup>) type for upward**

Standard No.	Experiment No.	Column number			Upward experiment conditions		
		A	B	C			
1	1	0	0	0	A0	B0	C0
2	3	0	0	1	A0	B0	C1
3	5	0	0	2	A0	B0	C2
4	7	0	1	0	A0	B1	C0
5	9	0	1	1	A0	B1	C1
6	11	0	1	2	A0	B1	C2
7	13	0	2	0	A0	B2	C0
8	15	0	2	1	A0	B2	C1
9	17	0	2	2	A0	B2	C2
10	19	1	0	0	A1	B0	C0
11	21	1	0	1	A1	B0	C1
12	23	1	0	2	A1	B0	C2
13	25	1	1	0	A1	B1	C0
14	27	1	1	1	A1	B1	C1
15	29	1	1	2	A1	B1	C2
16	31	1	2	0	A1	B2	C0
17	33	1	2	1	A1	B2	C1
18	35	1	2	2	A1	B2	C2
19	37	2	0	0	A2	B0	C0
20	39	2	0	1	A2	B0	C1
21	41	2	0	2	A2	B0	C2
22	43	2	1	0	A2	B1	C0
23	45	2	1	1	A2	B1	C1
24	47	2	1	2	A2	B1	C2
25	49	2	2	0	A2	B2	C0
26	51	2	2	1	A2	B2	C1
27	53	2	2	2	A2	B2	C2

실험계획법에 따라 27개의 실험의 가공을 실시하고 가공이 완료된 결과물을 표면 거칠기를 측정하여 3차원 데이터를 획득하였다. 머시닝센터를 이용하여 가공이 완료된 피삭재는 접촉식 3차원 측정기를 사용하여 표면 거칠기를 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 경사부 가공시 절삭력과 공구변형

본 연구에서 경사부를 불 엔드밀 가공시 절삭력과 공구변형 측정을 실험계획법 직교배열법에 의한 인자 및 수준 배치로 27개의 실험조건으로 수행하였다. 가공 실험조건은 직교배열에 의한 3개의 인자와 3개의 수준의 조합으로 얻어진 27개의 실험조건에 따라 상방향 절삭 가공을 2번 실시하였다.

실험조건은 실험번호1은 15도 경사면에서 상방향 절삭 가공시에 발생하는 공구 변형량을 와전류 센서로 그리고 공구동력계에 의해서 절삭력을 획득한 결과이며, 이때 가공 조건은 주축회전수 2000 rpm, 이송속도 100 mm/min, 절삭 깊이는 0.5 mm이며 사용공구는 직경 6mm의 2날 불엔드밀을 사용하였다.

Fig. 6은 실험번호 1의 조건인 각도 15도, 주축회전수2000rpm, 이송속도 100mm/min, 깊이 0.5mm일 때 X, Y, Z축 방향의 절삭력과 X축 방향의 공구변형을 보여주고 있으며, 그 결과에서 알 수 있듯이 경사면의 각도가 커질수록 가공시 절삭력의 크기와 공구의 변형량이 커짐을 알 수 있었다. 또한 직교배열표에 따른 실험결과를 X, Y, Z축 방향의 절삭력과 X축 방향의 공구변형을 나타내고 있다.

가공시간에 따라 Fig. 6(a) X방향의 절삭력이 40~50정도, Fig. 6(b) Y방향의 절삭력이 60~70정도, Fig. 6(c) Z방향의 절삭력이 80~90정도로 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한 Fig. 6(d) X방향의 공구변형도 가공시간에 따라 0.04~0.06 정도로 나타나는 것을 알 수 있다. 가공시간에 따라 가공 시작 지점에서 절삭력과 공구 변형이 지속적으로 상승하며, 계속 가공이 진행됨에 따라서 절삭력과 공구변형이 일정하게 유지 되고, 끝나는 지점에서 절삭력과 공구변형이 급격하게 줄어들면서 반대로 나오는 것을 알 수 있다.

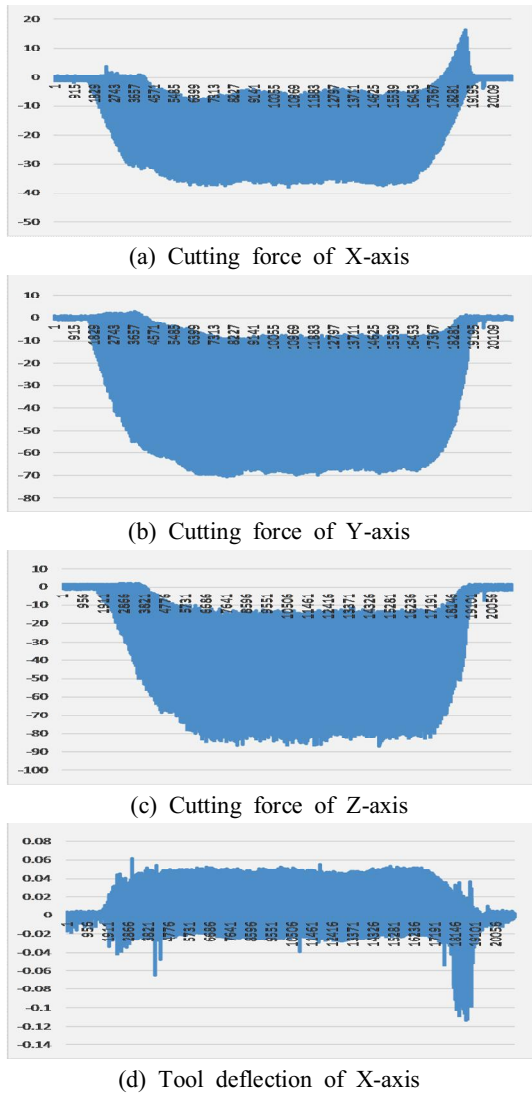


Fig. 6 Measured cutting forces and tool deflection for 15° inclined surface (s2000, f100, depth 0.5)

Fig. 7는 X축, Y축, Z축의 평균 절삭력과 변동량을 각도별로 정리하였다. 각도별 평균 절삭력과 변동량을 비교해 보면 15, 30도 에서는 비슷하게 나오지만, 45도 일 때 가장 많은 것을 알 수 있다. 그리고 이송속도가 높아짐에 따라 평균 절삭력과 변동량이 상승하는 것을 알 수 있다.

Fig. 8는 X, Y, Z축의 절삭력과 공구변형을 이송속도가 같을 때 회전수 별로 정리하였다. 경사면이 15도에 이송속도 100mm/min로 같게 하여 회전수를 S2000, S2500, S3000에서 비교해 보면 절삭력이 변화하는 것을 알 수 있으며, 회전수 S2500에서 절삭력이 가장 많은 것을 알 수 있다.



Fig. 7 Measured cutting force of x-axis for upward machining for inclined surface

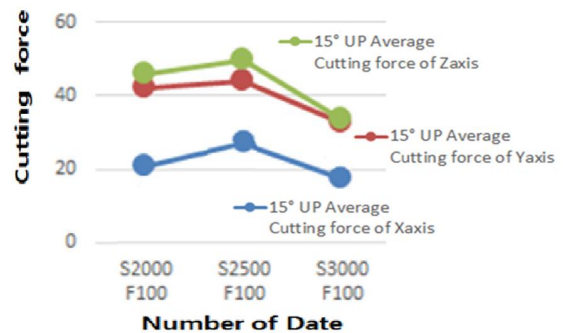


Fig. 8 Measured cutting force for 15° inclined surface



절삭가공 실험에서 공구의 진입부에서 순간적인 절삭력이 발생하였고 가공이 진행되면 절삭력이 일정하게 나타났으며, 모든 각도에서 X축 절삭력이 경사면 가공이 끝나는 부분에서 큰 절삭력 발생과 공구변형이 나타났는데 공구가 부하를 많이 받는 것으로 보인다.

상방향 가공에서는 45°에서 절삭력과 공구변형이 크게 나타나 공구가 부하를 많이 받는 것으로 나타났다. 상방향 가공 시 불 엔드밀의 외경부위에서 절삭이 이루어지다보니 X, Y, Z축 절삭력이 골고루 받는 것을 알 수 있었다.

15°에서는 S2500, F200일 경우, 30°에서는 S2000, F200일 경우, 45°에서는 S2500, F200일 경우 절삭 부하를 많이 받는 것으로 나타났다. 이처럼 각도와 회전수가 커짐에 따라, 절삭력이 증가하는 경향을 보였으며 절삭력과 공구의 변형이 45°경사면 가공 시 급격히 증가하는 것은 공구와 피삭재 간의 접촉면적이 급격히 증가하는 것에 의한 결과라고 생각 된다.

### 3.2 절삭동력과 공구변위의 분산분석

공구동력계와 와전류센서로 부터 측정된 값의 최대치에 대하여 분산분석을 수행하였다. 분산분석에서 유의수준은 0.05즉, 5%로 설정하였고  $P < 0.05$ 가 되면 유의하다고 볼 수 있다. 유의하다는 것은 인자에 영향을 미친다는 것이고 즉, 실제가공에서 영향을 주는 요인이라고 할 수 있다. 경사면 형상에서 절삭조건의 변화에 따른 공구동력계에서 측정된 X, Y, Z축의 측정결과에서 최대값의 평균을 가지고 Minitab 통계분석 프로그램을 이용하여 유의성 검정을 통해 어떤 인자가 가공에 영향을 미치는지 확인하였다.

분산분석에서  $P < 0.05$ 가 되면 유의하다는 것을 알 수 있으며 분산분석 결과에서  $P < 0.05$ 로 공구동력계 측정의 최대값 평균은 분산분석결과에서 각도와 회전수 인자가 유의하게 나왔으며, 분산분석의 주효과 플롯은 Fig. 9과 같이 나타났다.

Fig. 9에서 살펴보면 상방향 가공시 A (각도)에서는 1 (15°), 2 (30°), 3 (45°)중에서 각도 30°일 때 절삭력이 크게 나오는 것을 알 수 있으며, B (주축회전수)에서는 1 (2000RPM), 2 (2500RPM), 3 (3000RPM)

중에서 주축회전수 3000RPM 일 때 절삭력이 크게 나왔으며, C (이송속도)에서는 1 (100mm/min), 2 (150mm/min), 3 (200mm/min) 중에서 이송속도 100mm/min일 때 절삭력이 크게 나왔다. 따라서 정리하면 각도 30°, 주축회전수 3000RPM, 이송속도 100mm/min 일 때 절삭력이 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

와전류센서에 의해 측정된 공구의 변형에 대한 X축의 측정결과에서 최대값의 평균을 가지고 어떤 인자가 가공에 영향을 미치는지 확인하였다.

분산분석에서  $P < 0.05$ 가 되면 유의하다는 것을 알 수 있으며 분산분석결과에서  $P < 0.05$ 로 와전류센서 측정의 공구변형 최대값 평균은 분산분석결과에서 각도가 유의하게 나왔으며, 분산분석의 주효과 플롯은 Fig. 10과 같이 나타났다.

Fig. 10에서 살펴보면 상방향 가공시 A(각도)에서 1 (15°), 2 (30°), 3 (45°)중에서 각도 45°일 때 공구변형이 크게 나왔으며, B (주축회전수)에서는 1 (2000RPM), 2 (2500RPM), 3 (3000RPM)중에서 주축회전수 2500RPM 일 때 공구변형이 크게 나왔으며, C (이송속도)에서는 1 (100mm/min), 2 (150mm/min), 3 (200mm/min) 중에서 이송속도 200mm/min일 때 공구변형이 크게 나오지만 차이가 거의 나지 않은 것을 알 수 있다. 따라서 정리하면 각도 45°, 주축회전수 2500RPM 일 때 공구변형이 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

분산분석결과에서 공구동력계와 와전류센서에 의해 측정된 값에 대한 최대값 평균의 분석에서는 상방향 가공에서는 각도 인자와 회전수 인자가 유효한 것을 발견하였다.

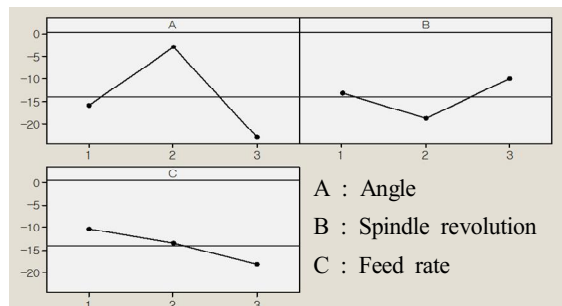


Fig. 9 Main effect plot of cutting forces for upward machining for inclined surface

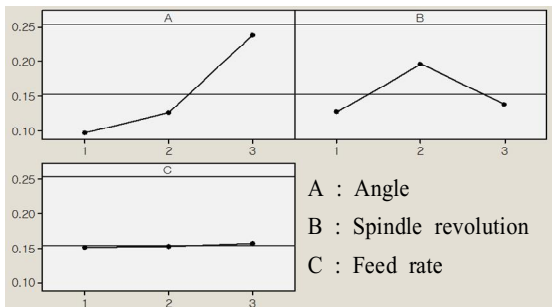


Fig. 10 Main effect plot of tool deflection for upward machining for inclined surface

#### 4. 결 론

본 연구에서는 피삭재 SM45C 소재를 머시닝센터에서 경사면을 따라 상방향으로 볼 엔드밀 가공시 영향을 미치는 가공조건의 요인(factor)으로 경사면의 각도, 공구회전수, 이송속도를 3수준(level)으로 선정하고 직교배열표를 이용한 절삭력과 공구변형에 따라 미치는 영향을 통계적 방법으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 분산분석의 유의수준 5%하에서 절삭동력 측정 최대값 평균의 분산분석 결과 상방향 가공에서 각도와 회전수, 이송속도가 영향을 주는 것으로 나타났다.
2. 분산분석의 유의수준 5%하에서 공구변형 측정 최대값 평균의 분산분석 결과 상방향 가공에서는 각도와 회전수가 영향을 주는 것으로 나타났다.
3. 각도와 회전수에 따라서 공구의 변형이 발생하였으며, 공구가 시편의 가공 진행되는 부분보다 가공이 끝나가는 종결부에서 가장 큰 절삭력을 받으며 공구의 변화가 급격히 일어남을 알 수 있었다.

#### REFERENCES

1. Kim, I. S., Kim, S. H., Lee, D. S., Wang, D. H. "Cutting Force Characteristics and Tool Deflection When Machining Rectangular Shapes with a Ball

End Mill", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 18, No. 6, pp. 26-32, 2019.

2. Cho, B. M., Lee, D. J., "A Study on the Prediction of Tool Deflection and Precision Machining in Ball End Milling Process", The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 16 No. 9, pp.1669-1680, 1992.
3. Park, H. D., Yang, M. Y., "A study on the prediction of cutting force in ball-end milling process", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers Vol. 13, No.3, pp.433-442, 1989.
4. Lim, E. M., Feng, H. S., Menq, C. H., "The Prediction of Dimensional Error for Sculptured Surface Productions using the Ball-End Milling Process - Part 1 : Chip geometry Analysis and Cutting force prediction", International Journal of Machine Tools & Manufacturing, Vol. 35, No. 8, pp. 1149~1169, 1995.
5. Lim, E. M., Menq, C. H., "The Prediction of Dimensional Error for Sculptured Surface Productions using the Ball-End Milling Process - Part 2 : Surface Generation Model and Experimental Verification", International Journal of Machine Tools & Manufacturing, Vol. 35, No. 8, pp. 1171~1185, 1995.