

밀링가공에서 부등각 엔드밀의 절삭특성에 관한 고찰

An Evaluation on Cutting Characteristics in Milling Process with Different Helix Angle Endmills

이상복*(대구기능대학), 김원일, 왕덕현**(경남대 기계자동화공학부), 김실경*(대구기능대학)

S. B. Lee, S. K. Kim*(Daegu Polytechnic College),
W. I. Kim, D. H. Wang**(Kyungnam Univ.)

Abstract

The experimental research was conducted to find an end mill with an ideal helix angle, which has a superior anti-vibration effect and a low machining-tolerance. A conventional endmill which all four blades are 30° helix angles and a different helix angle endmill which the opposite two blades are 30° and the other opposites are different helix angles were studied. The cutting force, machining tolerance and surface roughness were obtained. The AE signals appeared to have low values in up-milling rather than in down-milling. These are also appeared to have low values at low spindle revolutions rates. The cutting force values of Fxy and Fxyz were found to be increased according to the value of helix angle. In up-milling, it was difficult to find a definite tendency in machining tolerance, but in down-milling, machining tolerance of the different helix angle end mill was found to be lower than that of the convention end mill. There is a definite tendency that the surface roughness gets better as the RPM increases. In down-milling, Type A(25°+ 30°) appeared to bring the most satisfactory result.

Key Words: Cutting force(절삭력), Machining tolerance(가공오차), Different Helix Angle Endmill(부등각 엔드밀),

1. 서 론

소비자의 다양한 욕구를 충족시키기 위하여 제품의 성능뿐만 아니라 디자인을 중요시하는 경향으로 종래의 소품종 다량생산 시스템에서 다품종 소량생산 시스템으로 전환되었다. 이것은 곧 유

연 생산시스템(FMS), 컴퓨터통합시스템(CIM)으로 발전하게 되었다.

또한 각종 신소재의 개발과 고속가공기술, 특수가공기술 등 가공기술의 급속한 발전과 함께 각종 절삭공구의 개발이 요구되었다. 절삭가공 중 활용도가 높은 엔드밀에 의한 절삭가공은 점차 그 중요성이 증대되어 가고 있다. 엔드밀가공시 일반적으로 공구 마멸, 공구파손, 공구의 휨 등이 발생하며, 이를 검출하고 분석하는데 있어 절삭력은 중요한 인자이며 이에 대한 연구가 절실히 필요하다. 일반적으로 절삭력에 의한 공구의 휨은 가공오차를 유발하게 하고 표면을 거칠게 할 뿐 아니라 진동을 가져오게 하는 주요한 원인이 된다. 공구의 휨은 절삭속도, 이송량, 절삭깊이 등 절삭조건에 따라서 많은 변화가 있으나 공구의 마멸이나 엔드밀의 고정 돌출길이, 헬릭스 각도 등에 의한 영향도 크다.

엔드밀 절삭 해석에 대한 연구는 Martellotti¹⁾가 엔드밀 가공시 상향 및 하향 밀링 공정에서의 공구 경로에 따른 미변형 칩두께 변화에 대한 기하학적 해석을 통하여 엔드밀 절삭과정의 특징을 규명하였다. Budak 등²⁾은 동절삭력 모델을 이용하여 분석적 예측을 통한 채터진동을 예측하였으며 Elbestawi 등³⁾은 공구와 공작물 사이의 감쇠를 고려한 모델을 개발하였고, Yung 등⁴⁾은 어떠한 절삭모델을 사용하느냐에 따라 채터의 예측값이 달라짐을 확인하였다.

본 연구에서는 다변화되어 가고 있는 생산현장의 밀링가공에서는 좀 더 효율적이고 정밀한 가공을 위한 엔드밀의 개발을 목적으로 표준 비틀림각(30°)을 가진 고속도강 4개 날의 등각 엔드밀과 4개 날 중 2개 날이 비틀림 각도를 달리하는 부등각 엔드밀의 6종류를 사용하여 절삭가공을 수행하였으며, 이때의 절삭력의 크기와 표면 거칠기, AE신호에 의한 진동, 가공오차를 조사하여 등각 엔드밀과 부등각 엔드밀의 특성을 비교 분석하여 산업 현장의 생산 가공에 있어서 가장 적절한 공구를 선정할 수 있는 선택의 폭을 넓히 고자 하였다.

2. 관련이론

엔드밀링은 공구의 회전과 피삭재의 이송으로 인하여 반지름방향의 절삭 칩 두께가 변하고, 절입과 이탈을 반복적으로 수행하는 절삭기구상 단속절삭이라 할 수 있다.

절삭날이 피삭재로 절입할 때의 충격과 이탈할 때에는 급격한 에너지의 변화를 가져오기 때문에 절삭력은 절삭시간에 따라 계속해서 변동하게 된다. 엔드밀링에 있어서 절삭날의 수가 많아지면 복수의 날이 동시에 피삭재를 가공한다.

절삭력에 의한 간단한 공구변형 모델은 공구홀더를 강체로서 변형이 일어나지 않는다고 가정하고, 공구를 외팔보로 간주하여 정의한 경우이다⁵⁾. 이 모델은 Fig. 1(a)에서 나타낸 바와 같이, 수평방향의 힘 F 가 공구의 끝에 작용하며, 공구끝단의 수평방향 변형량 δ 는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta = \frac{FL^3}{3EI} \quad (1)$$

이 모델보다 좀 더 향상된 것은 절삭력의 작용점을 공구끝단으로 제한하지 않고 공구 끝에서 어느 위치만큼 떨어진 위치에 존재하는 경우이다⁶⁾.

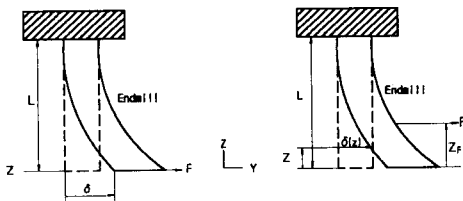
$$\delta = \frac{F(2L + z_F)(L - z_F)^2}{6EI} \quad (2)$$

여기에서, Z_F 는 공구끝단에서 절삭력 중심까지의 거리이며, L 은 공구의 길이를 나타낸다.

Kline⁷⁾는 공구변형 모델로 Fig. 1(b)에서와 같이 공구의 끝단에서 z 만큼 떨어진 점에 작용하는 수평변형량 $\delta(z)$ 를 식(3)으로 나타내었다.

$$\delta(z) = \frac{F}{2ER^4} [(z_F - z)^3 - (L - z)^3 + 3(L - z)^2(L - z_F)] \quad (3)$$

여기에서 $(z_F - z)^3$ 는 z 의 특성함수를 나타낸다.



(a) Force at end (b) Force at Z_F
Fig. 1 Tool deflection models

3. 실험장치 및 방법

실험장치와 실험방법은 Fig. 2와 같이 (주)통일에서 생산된 CNC 머시닝센터(TNV-40A)의 테이블 위에 공구동력계(Kistler-9257BA)를 설치하고, 공구동력계 위에는 제작된 시험편의 구멍에 볼트를 넣어 공구동력계의 윗면과 체결하였다. 엔드밀은 콜릿치으로부터 정확히 60mm를 돌출시켰으며, 공구동력계의 제어장치(Kistler-5233A)에 의하여 절삭력 성분을 측정하였다. 가공 중에 얻어지는 절삭력, F_x , F_y , F_z 는 NI-DAQ Board를 통해 PC에 저장되도록 하였으며, 가공 후에는 CNC 머시닝센터의 헤드에 설치한 전기 마이크로 미터로 연삭된 시험편의 윗면으로부터 1mm 아래 지점을 "0"으로 셋팅하여 아래로 내려가면서 매 1mm마다 7개 부위에서 엔드밀의 휨에 의한 가공오차를 측정하였다. 가공오차를 측정할 때 사용한 레버형 전기마이크로미터는 (주)한국일측에서 생산된 Model KG-LA-01로 측정할 수 있는 최소 눈금이 $0.5\mu\text{m}$ 이다.

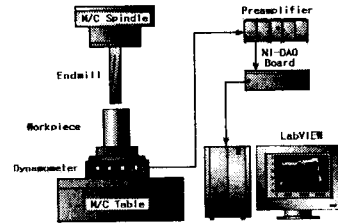


Fig. 2 Diagram of experimental setup

절삭공구는 고속도 공구강재용 SKH2의 평 엔드밀에 비틀림 각도를 7종류로 하여 전체길이(L)가 80mm, 지름(N)이 16mm, 날길이(M)가 25mm의 4날엔드밀로 제작하여 PVD(Physical Vapor Deposition : 물리적 증착법)방법에 의하여 TiN으로 코팅하였다. 제작된 엔드밀은 Fig. 3의 개략도와 같고, 그 주요 제원은 Table 1과 같다.

Fig. 3과 Table 1에서 보는 바와 같이 네날이 같은 30° 의 등각 엔드밀($\phi 16\text{mm}$)과 네날 중 마주보는 두날을 30° 로 고정하고 나머지 두날을 25° , 27° , 29° , 31° , 33° , 35° 로 변화를 주어 부등한 각을 형성하였다. 부등각 엔드밀은 연속된 절삭날의 끝 부분이 각기 다른 비틀림각을 가지는 부등한 각으로 인하여 원주상의 날 피치가 각각 다르다. 이 때문에 엔드밀의 날 중앙으로부터 날끝 부분으로 내려갈수록 Fig. 3과 같이 B각은 감소하고 A각은 증가하여 절삭날의 위치에 의하여 결정되는 공작물과 공구사이의 접촉상태는 기하학적으로 다르다. 바닥날을 등피치로 할 경우, 자루 부분으로 올라 갈수록 부등한 날 피치의 간격이 커져, 좁아지는 홈에서는 칩 배출이 어려울 뿐만 아니라 제작상에도 어려움이 따르게 되어 날길이 중심부에서는 등피치가 되도록 제작하여 이러한 문제를 해결하였다.

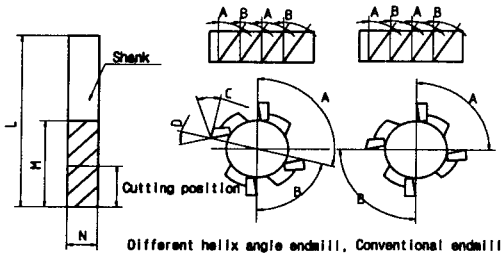


Fig. 3 Schematic diagram of different helix angle endmill

Table 1 Sorts of endmill angle for different helix angle

| Endmill type | Helix angle A(°)B(°) | Rake angle D(°) | Clear angle C(°) |
|--------------|----------------------|-----------------|------------------|
| D | A=30°, B=30° | 8 | 8 |
| A | A=30°, B=25° | 8 | 8 |
| B | A=30°, B=27° | | |
| C | A=30°, B=29° | | |
| E | A=30°, B=31° | | |
| F | A=30°, B=33° | | |
| G | A=30°, B=35° | | |

시험편은 일반구조용 압연강재(SS41 혹은 SS400)로 Photo. 1과 같이 윗면과 아래면을 로타리 연삭기로 연삭을 하고 연삭된 윗면을 기준면으로 하여 평밀링커터로 육면체를 가공한 후, 절삭 실험 단면이 60×10×10mm가 되도록 가공하였으며 공구동력계에 장착하기 위하여 25mm의 간격으로 9mm드릴로 구멍을 뚫어 구멍중심으로부터 절삭 단면까지 50mm가 되도록 하였다.

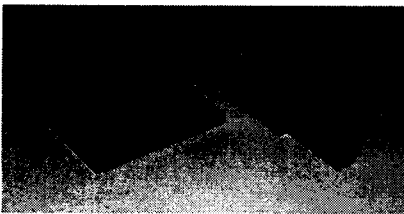


Photo. 1 Photograph of machined workpiece

시험편은 기계에 장착할 때 테이블 좌우 이송면에 대하여 정확히 수평이 되도록 설치한 후, 시험가공에 사용하지 않는 초경 엔드밀로 정삭가공을 실시하여 시험가공 후 시험편의 오차로 인한 가공오차가 발생치 않도록 하였다. 이때의 절삭조건은 Table 2와 같다.

Table 2 Machining conditions

| Item | Specification | Value |
|-------------------|--------------------|------------------------|
| Cutting condition | Spindle speed(rpm) | 200, 300, 400, 500 |
| | Feed rate(mm/min) | 120 |
| | Cutting depth(mm) | 1 |
| | Cutting method | Dry Cutting (Up, Down) |

4. 실험결과 및 고찰

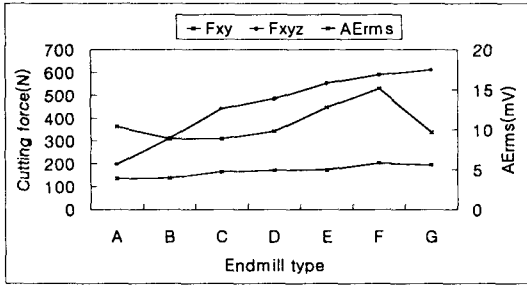
4.1 헬릭스각과 주축 회전수의 변화에 따른 AE신호와 절삭력 특성

Fig. 4는 절삭깊이 1mm, 엔드밀이 1회전할 때 상향절삭에서 헬릭스 각도와 주축 회전수 변화에 대한 AE신호와 절삭합력의 상태를 나타낸 것이다. Fig. 4에서 나타난 바와 같이 헬릭스 각도를 클수록 합력 Fxy는 약간 증가하는 경향이 있으며, Fxyz는 크게 상승하는 모습을 보이고 있다. 이것은 Fz축의 (-)방향으로 미치는 힘(공작물을 들어 올리는 힘)이 헬릭스 각도가 클수록 강하게 작용함을 알 수 있으며, AE신호는 절삭력의 크기의 변화에 따라 별다른 경향이 없음을 볼 수 있다. 또한, 회전수를 크게 하면 AE신호는 크게 증가하고 합력 Fxy는 많이 감소하는 경향을 보이고 있으나, 합력 Fxyz는 회전수의 변화에 대하여 약간 감소하는 것으로 보인다. 이것으로 Fz방향의 힘은 회전수의 증가와 더불어 상승하는 경향이 있음을 알 수 있으며, 또한 회전수의 증가와 더불어 헬릭스 각도의 크기가 클수록 합력 Fxyz가 증가하는 폭이 줄어드는 경향이 있음을 알 수 있다.

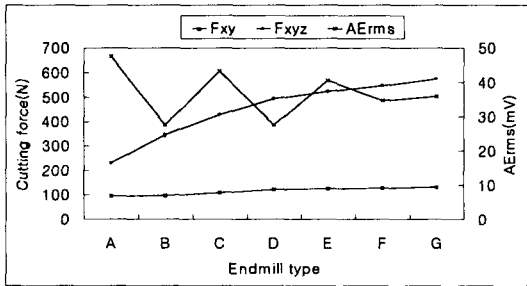
Fig. 5는 하향절삭에서의 AE신호와 절삭합력의 상태를 나타낸 것이다. 전반적으로 합력 Fxy, Fxyz는 헬릭스 각도가 클수록 커지고, 회전수가 클수록 약간 감소하는 경향으로 상향절삭시와 같은 유형을 보이고 있다.

AE신호는 회전수의 증가에 따라 다소 상승하는 경향을 보이고 있으며, 상향절삭에서 불규칙한 진동으로 어떠한 경향도 찾기 어려웠던 AE신호가 여기에서는 헬릭스 각이 커짐에 따라 약간 상승하는 경향을 보이고 있다.

상향절삭을 했을 때 AE신호로는 B형과 G형이 가장 안정된 상태로 나타났고, 절삭력은 헬릭스 각도가 클수록 크게 나타나는 일반적인 경향만 보였다. 하향절삭시 AE신호로는 B형 엔드밀이 항상 등각 엔드밀인 D형보다 안정된 상태를 보이고 있다. 또, 상·하향절삭을 비교하면 절삭력은 유사하나 AE신호는 하향절삭이 더 양호한 것으로 나타났다.

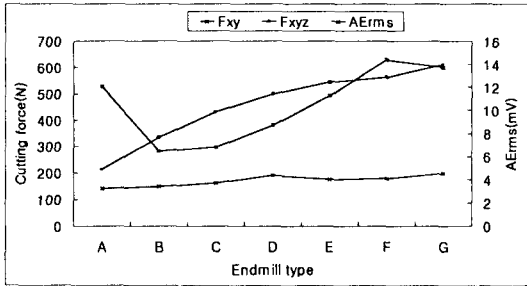


(a) 200rpm of spindle speed

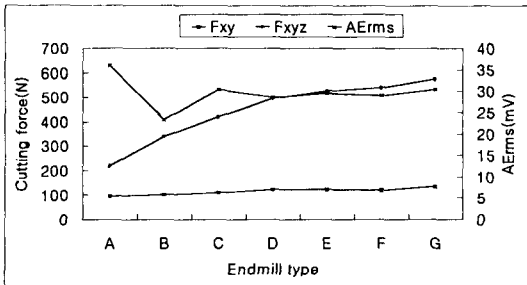


(b) 400rpm of spindle speed

Fig.4 Relation between AE and cutting force signals according to the change of helix angle for up-cutting



(a) 200rpm of spindle speed

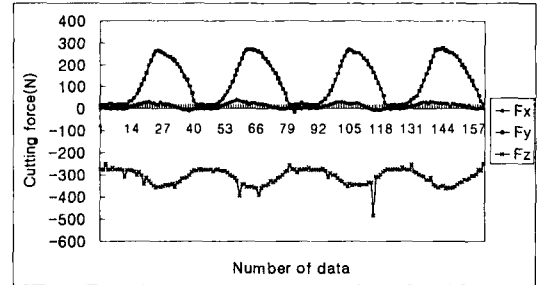


(b) 400rpm of spindle speed

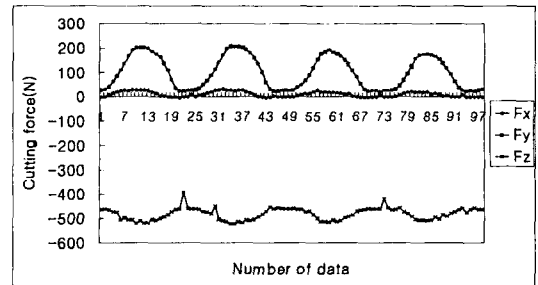
Fig.5 Relation between AE and cutting force signals according to the change of helix angle for down-cutting

4.2 측정된 AE신호와 절삭력 거동 특성

Fig. 6과 Fig. 7은 절삭깊이 1mm일 때의 상향 절삭과 하향절삭에서 엔드밀이 1회전할 때의 실제 측정된 AE신호와 F_x , F_y , F_z 의 절삭력 거동을 나타낸 그림이다. 상향절삭시 F_y 와 F_z 는 (+)방향과 (-)방향으로 힘이 편중하여 작용하는 것을 볼 수 있으나, F_x 는 (+)방향으로 치우친 상태에서 주기적으로 (+),(-) 양쪽 방향으로 교차하여 작용한다는 것을 알 수 있다. 또한 하향절삭에서 F_y 는 F_x 보다 조금 큰 힘으로 F_x 와 같이 (+)방향으로 작용하고, F_z 는 상향절삭과 같은 (-)방향으로 힘이 작용하고 있음을 볼 수 있다. 대체로 상·하향절삭시의 합력 F_{xyz} 는 각도가 클수록 증가하는 추세지만, 상향절삭에서 F_x 는 (+),(-) 양쪽 방향으로 작은 힘이 작용하고 있어 합력에는 큰 영향을 주지 않고 있다. 그러나 이송방향의 힘 F_y 와 스핀들 길이방향의 힘인 F_z 는 (+)방향과 (-)방향으로 편중되어 큰 힘이 작용하고 있음을 볼 수 있다. 하향절삭은 세 축에 미치는 힘 중, F_x , F_y 의 두 힘은 (+)방향으로 작용하는 반면, F_z 는 (-)방향으로 헬릭스 각도의 크기가 증가함에 따라 크게 증가된 힘으로 작용함을 알 수 있다. 전술한 바와 같이 대체로 헬릭스 각도가 클수록 F_y 는 작아지고 F_z 는 커지는 경향을 보이고 있다.

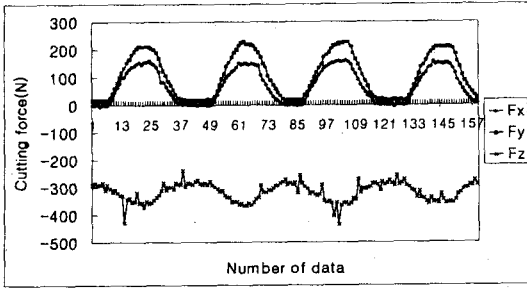


(a) B type($30^\circ+27^\circ$), 300rpm of spindle speed

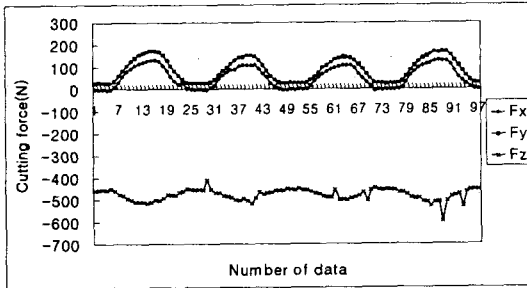


(b) D type($30^\circ+30^\circ$), 500rpm of spindle speed

Fig. 6 Measured cutting force for up-cutting



(a) B type(30°+27°), 300rpm of spindle speed



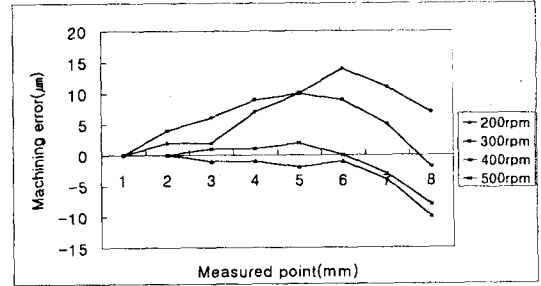
(b) D type(30°+30°), 500rpm of spindle speed

Fig. 7 Measured cutting force for down-cutting

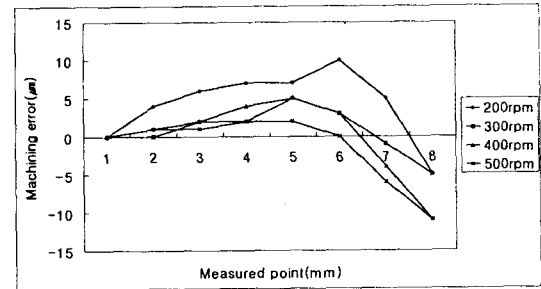
4.3 측정된 가공오차의 특성

Fig. 8과 Fig. 9는 실험에 사용한 모든 엔드밀로 상향절삭과 하향절삭을 실시하고 전기 마이크로미터로 절삭단면의 위에서 1mm 아래 지점에 "0"으로 셋팅한 후에 아래로 내려오면서 매 1mm마다 편차를 측정하여 그 값을 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 8에서 나타난 바와 같이 상향절삭에서는 대체로 측정위치 1~5 혹은 6mm위치까지는 (+)방향으로 휘어지다가 그 이후에서 8mm지점까지는 (-)방향으로 급격히 휘어짐을 볼 수 있다. 이것은 배분력의 작용방향에 의한 것임을 알 수 있고, 또한 큰 헬릭스각에 의한 수직분력의 작용과 시험편의 절삭단면이 고정지점으로부터 먼 거리에 위치해 있음으로 인하여 시험편이 수직 방향으로 떠오르는 현상에 기인한 것으로 생각된다. Fig. 9의 하향절삭에서는 엔드밀의 휨이 시험편의 (+)방향으로만 휘어져 있고 주축 회전수가 클수록 휘어짐이 적게 발생하는 경향이 잘 드러나 있다.

상향절삭에서는 부등각 엔드밀이 우수하다는 경향을 찾기 어려웠으나, 하향절삭에서는 대다수의 부등각 엔드밀이 등각 엔드밀보다 오차가 적은 것으로 나타나 하향절삭에서는 부등각 엔드밀의 성능이 뛰어남을 볼 수 있다.

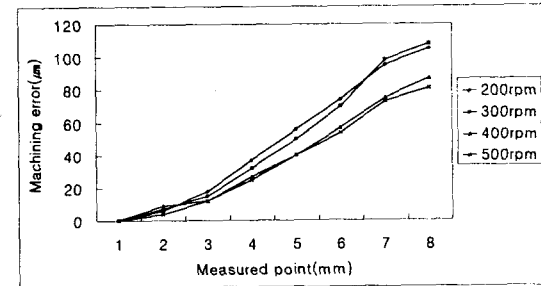


(a) B type endmill (30°+27°)

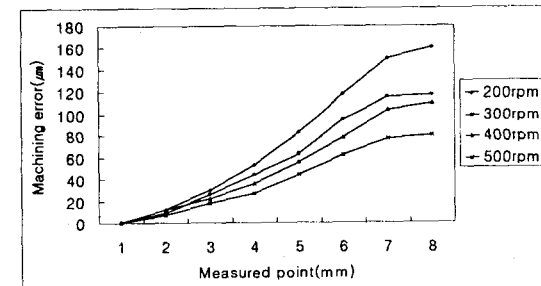


(b) D type endmill(30°+30°)

Fig. 8 Machining errors for up-cutting



(a) B type endmill(30°+27°)



(b) D type endmill(30°+30°)

Fig. 9 Machining errors for down-cutting

4.4 헬릭스 각도 변화에 따른 표면거칠기 특성

Fig. 10은 절삭실험에 사용한 모든 엔드밀에 의한 상향절삭에서 주축 회전수 변화에 따라 가공

한 후 가공면의 표면거칠기 값을 그래프로 나타낸 그림이다. Fig. 10에서 보는 것과 같이 회전수가 클수록 표면 거칠기는 더 좋은 경향으로 나타났고, 상향절삭에서는 헬릭스 각도가 클수록 조금 거칠어지는 경향을 보이고 있으며, 모든 회전수에서 A형 부등각 엔드밀의 표면거칠기 값이 가장 양호한 것으로 나타났다.

Fig. 11은 D형의 등각 엔드밀로 절삭깊이 1mm로 하향절삭 가공한 후, 회전수 변화에 따른 표면 거칠기 나타낸 그림이다. Fig. 11의 그림에서 보는바와 같이 회전수의 증가에 따라 표면 거칠기가 양호해짐을 볼 수 있고, 전반적으로 하향절삭보다는 상향절삭에서 더 양호한 표면거칠기를 나타내고 있다.

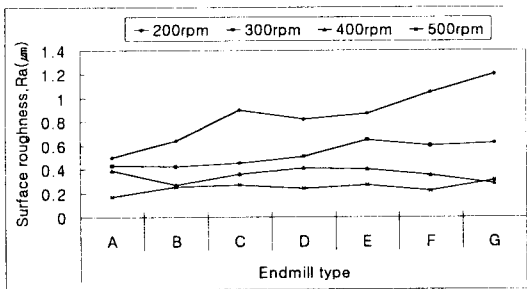


Fig. 10 Surface roughness for up-cutting

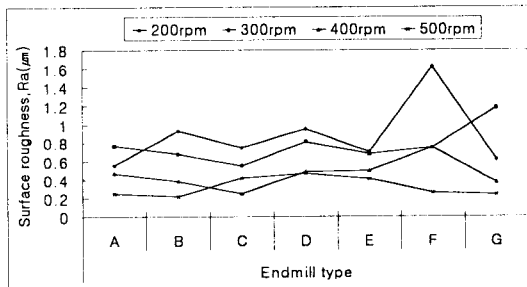


Fig. 11 Surface roughness for down-cutting

5. 결론

방진효과가 뛰어나고 가공오차가 적어 산업현장에서 직접 사용 가능한 이상적인 헬릭스각을 갖는 엔드밀을 찾기 위하여 네 날이 모두 30°의 헬릭스각을 갖는 표준 등각 엔드밀과 네 날 중 두 날은 30°로 일정하게 하고 마주 보는 나머지 두 날의 각도를 6종으로 변화를 준 부등각 엔드밀을 제작하여 머시닝센터에서 절삭실험을 수행하였다. 시험편의 소재는 극연강재인 SS400으로 하여 절삭력과 절삭진동, 가공오차, 표면거칠기를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. AE신호는 전반적으로 상향절삭보다 하향절삭에서, 주축회전수가 작을수록 더 양호한 경향으로 나타났다. 상향절삭에서는 등각엔드밀보다 부등각엔드밀의 B형(30°+27°)과 G형(30°+35°)을 사용할 때 가장 양호하였으나, 하향절삭에서는 B형이 등각엔드밀보다 더 양호하였다.
2. 절삭력은 전반적으로 Fxy와 Fxyz는 헬릭스 각도가 클수록 커지는 경향이 있었으나 각도가 커짐에 따라 증가하는 양이 현저히 줄어들었다.
3. 상향절삭에서 가공오차는 일정한 경향을 나타내지 않았으나 하향절삭에서는 대체로 부등각 엔드밀이 등각엔드밀보다 더 작은 것으로 나타났다.
4. 표면 거칠기는 대체로 회전수가 클수록 양호해지는 경향이 뚜렷하며, 상향절삭에서는 A형(25°+30°)이 가장 양호한 것으로 나타났다.

참고문헌

- [1] J. Tlustý and P. Macneil, "Dynamic of Cutting Force in End Milling", Annals of CIRP, Vol. 24, PP. 21-25, 1975.
- [2] E. Budak, Y. Altintas, "Analytical Prediction of Chatter Stability in Milling-Part I : General Formulation," ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 120, pp. 22~30, 1998.
- [3] M. A. Elbestawi, F. Ismail, R. Du, B. C. Ullagadi, "Modelling Machining Dynamics Including Damping in the Tool-Workpiece interface", ASME Journal of Engineering for industry, Vol. 116, pp. 435~439, 1994.
- [4] Yung C. Shin and Andrew J. Waters, "A New procedure To Determinate Instantaneous Cutting Force Coefficient For Maching Force Prediction," Int. J. Mach. Tools Manufact, Vol. 37, pp. 1337~1351, 1997.
- [5] W. P. Wang, "Solid Modeling for Optimizing Metal Removal of Three-Dimensional End Milling", J. Mach. Syst, Vol. 7, pp. 57~65, 1998.
- [6] R. E. Devor, W. A. Kline, W. J. Zdeblick, "A Mechanistic Model for the Force System in End Milling with Application to Machining Airframe Structures", Proc. 8th NAMRC, pp. 297~303, 1980.
- [7] W. A. Kline, R. E. Devor and J. R. Lindberg, "The Prediction of Cutting Force in End Milling with Application to Cornering Cuts", Int. J. Mach. Tool Des., Vol. 22, pp. 7~22, 1982.