

엔드밀 가공시 헬릭스각이 공구변위에 미치는 영향

맹민재*(동서울대 기계공학부), 이성찬(홍익대 대학원 기계공학과),
정준기(홍익대 기계공학과)

Effects of the Helix Angle on the Tool Deflection in End Milling

M. J. Maeng(Mech. Eng. Div., DSC), S. C. Lee(Mech. Eng. Dept., HIU),
J. K. Chung(Mech. Eng. Dept., HIU)

ABSTRACT

In the end milling operation the deflection of the cutter is an important factor affecting the accuracy of machining with implications on the selection of cutting parameters and economics of the operation. The deflection of the end mill was studied both experimentally with strain gauge, tool dynamometer, laser measuring apparatus and on a finite element model of the cutting using ANSYS software. The deflection of machining tool with various helix angles was studied with FEM simulation and experiment. ANSYS analysis performed on the finite element model of the end mill provides deflection results which agree within 15.0% with the experimental ones.

Key Words : End milling (엔드밀가공), Deflection (변위), Strain gauge (스트레인게이지), Helix angle (헬릭스각), Tool dynamometer (공구동력계)

1. 서론

최근 현대 산업 사회에서는 단기간 내에 생산품의 품질 향상과 고정밀도를 요구하고 있어 정확한 절삭 과정과 이론적 고찰은 필수 요구 조건이 되었다. 특히 금형, 항공기 및 조선 등에 사용되고 있는 기계 부품의 엔드밀 작업은 그 정확도가 더욱 더 요구되고 있는 추세이다. 엔드밀 작업시 가공 오차의 발생 원인은 공구 마멸, 런아웃, chatter, 처짐 등에 기인하는데, 이들 가운데 공구 처짐은 포켓, 홈 및 코너 가공에 가늘고 긴 공구를 사용함으로써 가공 오차 발생의 주원인이 되고 있다. 특히 엔드밀 공구의 자체 형상 특징이 가늘고 긴 형태이므로 그에 따른 강성 부족으로 절삭시 발생하는 절삭력에 의해 공구 처짐이 발생된다. 또한 엔드밀 공구가 회전함에 따라 칩의 두께가 계속 변할 뿐 아니라⁽¹⁾ 단속절삭이 이루어지기 때문에 절삭력이 시간에 따라 변화하는 특징이 나타난다.^(2,3) 이런 특징 때문에 공구 처짐을 줄이기 위해서는 고속 절삭과 고강성 공구를 사용해야 하지만 고강성 공구는 절삭력이 수시로 변화하는 엔드밀 작업에서 고유의 취성 때문에 파손이 될 수 있어, 주로 평면 작업이나 정삭 작업에만 제한적으로 사용하고 있

다. 고속도강 형태의 공구는 장시간 고속 절삭시 공구 마멸이 쉽게 됨으로써 절삭 속도만을 높이는 것은 생산성 증대 및 가공 효율적인 면에서는 한계가 있다.

엔드밀 작업시 공구 처짐은 표면 정밀도를 저하시키므로 Kline^(4,5)은 공구 처짐을 예측하기 위하여 엔드밀 공구를 단순보로 가정하여 절삭력에 의한 표면 정밀도를 예측하고, 작용하는 외력을 집중하중으로 단순화시켜 절삭력과 보의 처짐으로 해석하였다. Kops⁽⁶⁾는 엔드밀의 유효 직경을 FEM해석에 이용하기 위해 공구 유효 직경을 만들어 적용하였으나 다양한 공구 형상에는 적용의 한계가 있다. Smith⁽⁷⁾는 시스템의 동적 거동을 예측하기 위한 모델을 제시 한 바도 있다.

이와 같이 엔드밀 절삭 과정에 대한 연구는 절삭력에 따른 표면 정밀도를 정확하게 예측하고자 하는 목적을 가지고 있기 때문에 결정적인 영향에 미치는 공구의 처짐 모델을 위한 연구가 필요하다. 현재의 다양한 공구 형상에서 특히 헬릭스각이 변할 때 변위 예측은 Kops의 FEM해석 방법, 즉 단면형상의 유효 공구 직경을 일정하게 가정하고 분석하는 방법으로는 사용할 수 없다.

본 연구에서는 엔드밀 작업시 공구 자유단의 변위

를 예측하기 위하여 정적 및 동적 상태에서 변위를 각각 실험과 FEM해석에 의한 방법으로 비교·분석하여 자유단의 처짐 상태를 예측하고자 한다. 정적일 때 공구 처짐을 확인하기 위해서 실제와 거의 같게 단면 형상을 모델링한 FEM해석에 의한 정적 해석 방법을 통해 비교·분석한다. 그리고 동적일 때 절삭시 받는 힘을 실제 실험에 의해 측정하고, 측정된 힘을 FEM해석에 적용하여 엔드밀 작업시 정확하게 측정 할 수 없는 공구 자유단의 변위를 예측하고자 한다. 동시에 과도 부분의 변위는 레이저 측정기를 이용하여 검출한다. 또한 공구의 수명과 피삭재의 표면 정밀도에 영향을 주는 공구 자유단에서 발생하는 비틀림각 및 응력 분포의 경향도 도출하고자 한다.

2. 이론적 고찰

2.1 공구 굽힘 모델

엔드밀 가공시 절삭력에 의한 처짐은 주로 엔드밀의 공구의 횡방향으로 작용된다. 이는 절삭시 외력에 의한 하중을 집중하중으로 단순화함에 따라 설명 될 수 있다. 이때 엔드밀은 절삭 저항에 의하여 처짐이 일어나는데 그 처짐에 의해서 공구의 방향이 순간 이동하여 위치가 변하게 된다. 이때 변위 되는 모델은 집중하중 받는 외팔보로 가정할 수 있다.⁽⁴⁾ 외팔보 자유단에서 집중하중 $P=F_y$ 가 작용할 때 자유단으로부터 임의의 거리에 있는 임의의 단면에서의 변형은 굽힘 모멘트에 의하여 결정된다. 외팔보에 가해진 Y축 방향 엔드밀의 변위는 다음 식으로 표현된다.

$$dy = \frac{F_y}{6EI_y}(L_e^3 - 3L_e^2L_c + 2L_c^3) \quad (1)$$

여기서, dy 는 Y축 엔드밀의 변위, F_y 는 Y축 절삭력, L_y 는 Y축 힘의 중앙, I_y 는 엔드밀의 관성 2차 모멘트($I_y=(D^4/48)$)⁽⁹⁾, E 는 엔드밀의 탄성계수, L 은 엔드밀의 유효길이, L_e 는 자유단으로부터 임의의 거리이다. 여기서 다양한 형상의 엔드밀 일 때는 I_y 값이 바뀌게 된다.⁽⁸⁾ D 는 엔드밀의 상당 환봉 지름(유효 직경 지름)을 환산한 값이다. 대부분 $0.7 \sim 0.8D_0$ (D_0 =날부 지름)를 쓰는데 다양한 공구 형상에서는 한계가 있다고 판단된다.

3. 정적 실험 및 해석

3.1 실험 장치 및 방법

Fig. 3.1은 정적일 때 엔드밀의 변위를 측정하기 위해 CNC머시닝센터(DAEWOO, Mynx 500)에 부착한 실험장치의 구성을 보여준다. 절삭 가공과 동일한 조건을 만들어 주기 위해 엔드밀을 주축 스피indle에 장착시키고 공구 자유단 지점에서 이송방향으로 이동시켜 그 때 공구 자유단의 변위를 측정하였다.

동시에 검출되는 힘을 공구동력계(KISTLER 9257B, Amplifier:5019A)로 측정하였다. 그리고 공구 자유단으로부터 38mm위치, 즉 과도 부분의 변위를 측정하기 위해 스트레인 게이지(CAS AH600-A, 120 Ω)를 그 위치에 부착하여 측정하였다. 또한 엔드밀 변위를 인위적으로 주기 위한 접촉점은 날 끝 부분을 기준으로 하였다. 절삭공구는 2날 솔리드형 고속도강 엔드밀을 사용하였다.

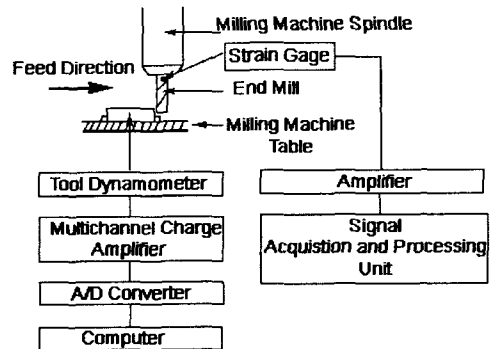


Fig. 3.1 Schematic diagram of experimental apparatus

3.2 FEM 해석 방법

엔드밀은 경사각, 경사면, 여유각, 밑날홈 등의 요소로 구성되어 있다. 따라서 원형대로 해석할 수 없다. 라운딩된 모서리 및 날 부위와 샹크 부분이 만나는 과도 부분에 라운딩을 제거해서 평면 처리하여 해석하였다. 날 부위로부터 샹크 부위까지는 날이 가늘게 줄어들다 없어짐으로 공구 자유단에서 25mm인 날 부위보다 좀 길게 하여 해석하였다. 공구 자유단으로부터 척이 잡고 있는 부위의 총 길이는 55mm로 하였다. 공구의 단면은 2차 모멘트와 중요한 관계를 가지므로 실제 엔드밀을 연삭기로 단면을 가공한 후 절단면을 디지털 카메라로 촬영하였다. 그리고 컴퓨터로 입력하여 CAD프로그램을 이용하여 엔드밀의 치수를 정확하게 다시 그리는 과정을 통하여 치수를 파악, 단면 형상을 제작하였다. 하중은 100N씩 0° 방향으로 공구 자유단에 주고 구속 조건은 55mm지점에 선 전체를 완전구속을 하였다. FEM해석 프로그램은 ANSYS를 사용하였다. 헬릭스각은 반드시 3차원 모델링으로만 해석이 가능하므로 3차원 모델링은 CAD/CAM 프로그램인 Pro-E를 사용하여 필요한 해석 조건을 구현하였다.

3.3 해석 결과

Fig. 3.2~3.3은 헬릭스각 30°, 40°에 대해 이송방향 힘의 증가에 따른 공구의 자유단 및 과도 부분의 변위를 각각 실험과 FEM해석에 의한 비교 결과를 나타낸다. 변위값은 자유단이 0.03mm, 과도부분은 0.01mm정도의 결과가 나타난다. 과도 부분의 변위는 실험에 비해 FEM해석에 의한 값이 미미하게 감소하

었다. 그 이유는 날 부위와 생크가 만나는 과도 부분을 평면 처리로 인한 오류인 것으로 사료된다. 자유단의 변위는 FEM해석에 의한 값이 다소 크게 나왔다. 그것은 실험 중 힘을 가할 때 공구동력계의 Z축 방향의 폭 만큼의 두께 값을 무시해서 나오는 오류로 생각된다. 힘이 크면 클수록 그 두께 값이 커지므로 실제 변위값 보다 적게 측정된다. 전체적으로 살펴보면 실험 및 FEM해석에 의한 변위의 측정 결과는 약 13%정도의 차이가 나타난다.

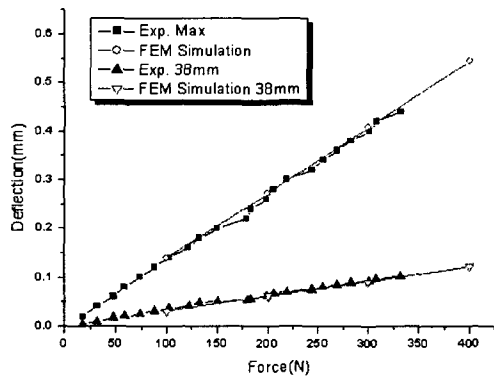


Fig. 3.2 Deflection versus force (helix Angle 30°)

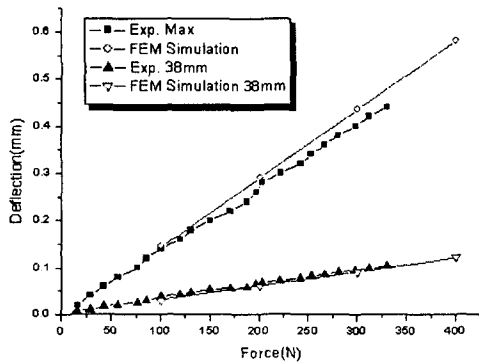


Fig. 3.3 Deflection versus force (helix Angle 40°)

Fig. 3.4는 FEM해석에 의한 헬릭스각에 따른 응력 분포를 나타내고 있다. 헬릭스각이 증가함에 따라 응력 분포가 증가하다가 40°에서는 과도 부분의 응력 분포가 뚜렷하게 감소함을 알 수 있다.

Fig. 3.5는 헬릭스각의 변화에 따라 X방향의 변위를 나타내고 있다. 헬릭스각이 커질수록 비례적으로 변위가 증가함을 알 수 있다. 그러나 과도 부분의 변위 측정치는 헬릭스각이 커짐에 따라 증가하다가 40°에서 작아지는 경향을 보였다. 이상의 결과를

종합하면 응력 상태도 결과에서 나타나듯이 날이 축 방향으로 꼬임 정도가 360° 정도 가까이 되면 응력 분포가 감소하여 과도 부분의 변위는 감소하는 것으로 사료된다.

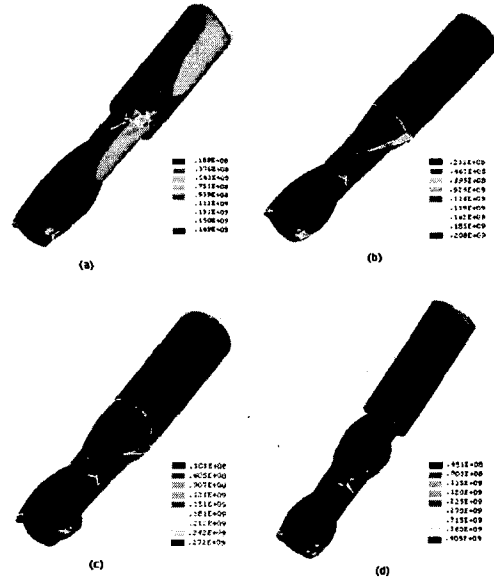


Fig. 3.4 Stress state by helix angle (a=25° , b=30° , c=35° , d=40°)

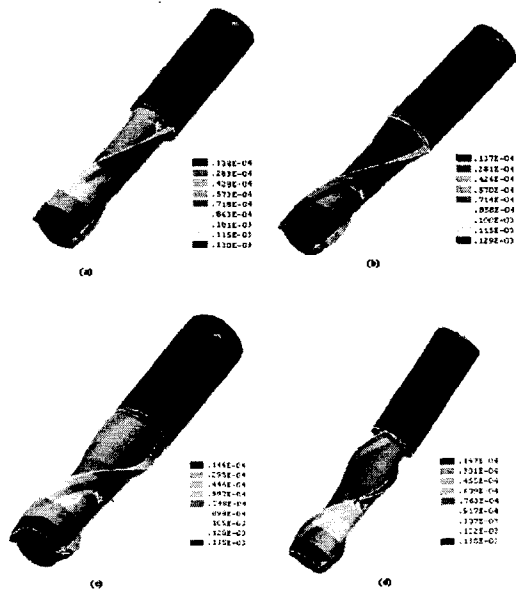


Fig. 3.5 X direction deflection by helix angle (a=25° , b=30° , c=35° , d=40°)

4. 동적 실험 및 해석

4.1 실험 장치 및 방법

Fig. 4.1은 엔드밀 가공중에 변위를 측정하기 위해 CNC머시닝센터에 부착한 실험장치의 구성을 보여준다. 실험장치는 비접촉식 레이저 측정기(Mach-Zehnder, 광원 2.3mW, 파장 633nm He-Ne 레이저)를 사용하여 엔드밀 과도 부분의 변위를 측정하였다. 동시에 공구동력계로 각각의 방향에 따른 절삭력을 측정하였다. 실험은 16가지의 절삭조건, 즉 헬릭스각 30°, 40°, 절삭속도 V=20, 25m/min, 이송속도 f=60, 80, 100, 120mm/min, 축방향절삭깊이 $d_a=2\text{mm}$, 반경방향절삭깊이 $d_r=5\text{mm}$ 에 대하여 SM45C를 하향절삭하면서 수행하였다.

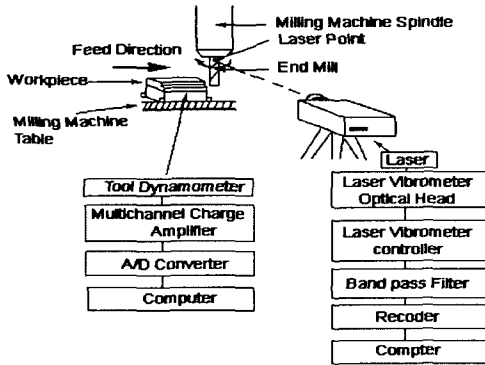


Fig. 4.1 Schematic diagram of experimental apparatus

4.2 FEM 해석 방법

Fig. 4.2는 동적 해석 과정에 대한 설명이다. 미소 절삭 날이 회전하면서 절삭이 이루어지고 일정한 스텝을 가지고 사이클을 이루고 있다. 그러므로 그 과정의 단계를 하나의 스텝으로 가정하여 날이 2개인 엔드밀은 날 하나의 사이클, 즉 180°를 회전할 때만 해석하면 될 것으로 사료된다. 또한 사이클은 시간과 절삭력의 그래프이므로 시간에 따라 변하는 힘에 대하여 임의의 절점의 변위를 해석하는 과도 해석이다. 그러므로 힘이 변하는 지점의 사이클을 하나의 하중 단계로 볼 수 있기 때문에 해석 절차는 다단계 절차를 따른다. 축방향 절삭깊이가 크면 하중 구간에서 임의의 절점이 헬릭스각 선도를 따라 올라갈 것이다. 하지만 축방향의 절삭 깊이가 매우 적은 양이면 공구 선단의 극히 일부분만 절삭에 참여하므로 시간에 따라 절삭 각도만 바꾸면서 과도 해석함이 올바른 해석방법이라 판단된다.

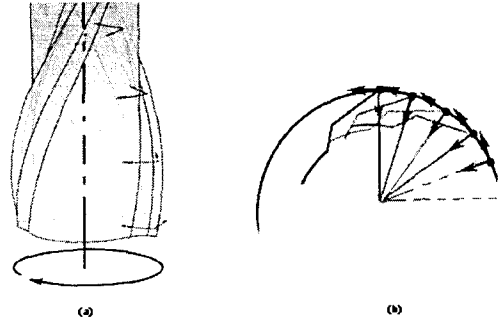


Fig. 4.2 Analysis abstract of end milling dynamic state in:(a)Whole tool state (b)Turning state of infinitesimal cutting edge

4.3 해석 결과

Fig. 4.3은 엔드밀 과도 부분의 변위를 실험과 FEM해석 결과를 비교하기 위해 헬릭스각, 절삭속도, 이송속도 변화에 따른 오차를 보여준다. 실험과 FEM해석 결과가 비슷한 경향으로 나왔으며 오차가 15%정도로 비교적 근사치를 나타내지만 정적일 때와 비교하면 오차율이 다소 높게 나왔다. 이송속도가 80mm/min경우에는 심한 차이가 나타났다. 이러한 오차는 채터 등의 요인으로 추정된다. 또한 해석시 특정 요소 절점에 대한 정확한 집중하중에 표현이 한계가 있고 표본 조사된 절삭력도 어느 정도 오차가 있다고 판단된다.

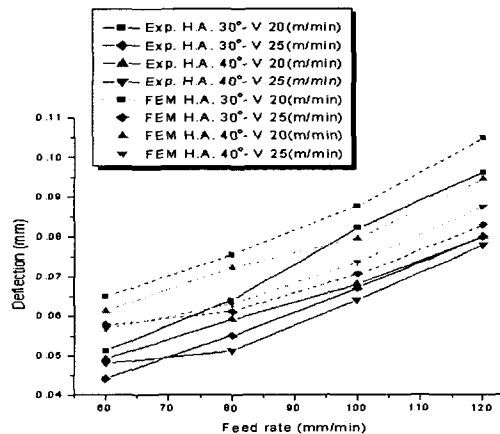


Fig. 4.3 Comparison of experimental and FEM

Fig. 4.4는 FEM해석에 의한 자유단의 변위 값을 나타내고 있다. 이송속도가 증가함에 따라 변위의 차이는 뚜렷하게 나타난다. 헬릭스각의 영향을 살펴보면 헬릭스각이 크면 변위가 감소하는 경향도 일치함을 확인할 수 있다. Fig. 4.3~4를 종합하면

자유단의 변위값을 FEM해석의 결과를 이용하면 변위를 효과적으로 알 수 있다.

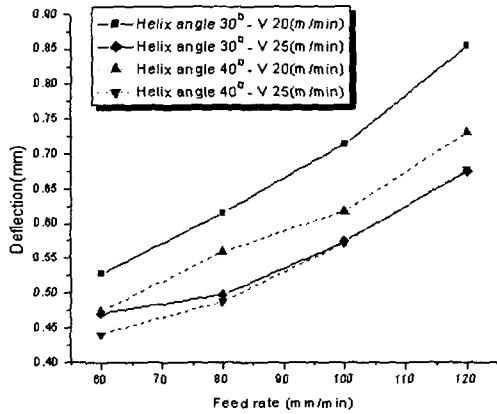


Fig. 4.3 Deflection versus feed rate

Fig. 4.4는 헬릭스각의 변화에 따른 비틀림 각도 및 응력 분포를 나타내고 있다. 결삭시와 동일한 조건을 부여하기 위해 날 부위에 특정힘, 즉 X축, Y축에 각각 100N을 동등하게 주고 그 결과를 살펴보았다. 실린더 좌표계로 엔드밀의 중심축을 중심점으로 바꾼 뒤 측정한 결과 값이다. 각각 헬릭스각이 25°, 30°, 35°, 40°일 때 0.407774°, 0.426796°, 0.430119°, 0.520990°의 비틀림 각이 나타났다. 결과를 종합하면 헬릭스각이 커질수록 비틀림 각이 증가하고, 비틀림 응력 분포는 헬릭스각이 40°에서 감소하는 경향을 나타낸다.

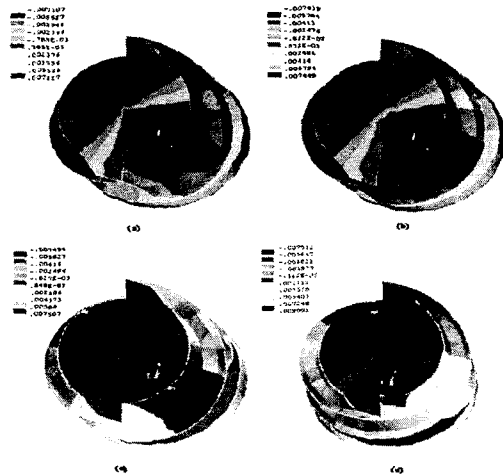


Fig. 4.4 Y direction rotation by helix angle (a=25°, b=30°, c=35°, d=40°)

4. 결론

엔드밀 가공시 헬릭스각이 공구변위에 미치는 영향을 정적과 동적인 경우로 나누어 실험 및 FEM해석을 비교하여 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 엔드밀의 유한요소모델에 대한 공구 변위 오차는 정적인 경우 자유단은 5~8%, 과도부분은 10~13%이며, 동적인 경우는 과도부분이 10~15% 정도로 나타났다. 진동을 고려한다면 오차는 크게 감소할 것이다.
- 2) 엔드밀 과도 부분의 변위는 헬릭스각이 커짐에 따라 증가하다가 40°에서는 감소한다.
- 3) FEM해석에 의한 공구의 비틀림 각은 각각 헬릭스각이 25°, 30°, 35°, 40°일 때 0.407774°, 0.426796°, 0.430119°, 0.520990°의 비틀림 각이 작용하며, 비틀림 응력 분포는 40°에서 뚜렷하게 감소한다.
- 4) FEM해석을 이용하면 헬릭스각의 변화에 구분 없이 자유단의 변위를 효과적으로 알 수 있다.

참고문헌

1. Marellotti, M. E., "An Analysis of the Milling Process," ASME, Vol. 63, pp. 677-700, 1941.
2. Tlustý, J., and Macneil, P., "Dynamics of Cutting Force in End Milling," Annals of the CIRP, Vol. 24, No. 1, pp. 21-25, 1975.
3. Tlustý, J., and Elbestawi, M., "Constraints in Adaptive Control with Flexible End Mills," Annals of the CIRP, Vol. 28, No. 1, pp. 253-255, 1979.
4. Kline, W. A., Devor, R. E., and Shareef, I. A., "The Prediction of Surface Accuracy in End Milling," ASME, Vol. 104, pp. 272-278, 1982.
5. Kline, W. A., and Devor, R. E., "The Effect of Runout on Cutting Geometry and Force in The Milling," Int. j. MDR, Vol. 23, No. 2, pp.123-140, 1983.
6. Kops, L., and Vo, D., "Determination of the Equivalent Diameter of End Mill based on Its Compliance," Annals of the CIRP, Vol. 39, No.1, pp. 93-96, 1990.
7. Smith, S., and Tlustý, J., "An Overview of Modeling and Simulation of the Milling Process," ASME, Vol. 113, pp. 169-175, 1991.
8. DeVor, R. E., and Sutherland, J., "An Improved Method for Cutting Force and Surface Error Prediction in Flexible End Milling System," ASME, Vol. 108, pp. 269-279, 1986.
9. 이승일, 맹민재, 정준기, "엔드밀 변위에 의한 공구파손검출," 한국공작기계학회지, 제8권, 제2호, pp. 100-107, 1999.