

헬릭스각의 변화에 따른 밀링공구의 변위 특성 연구

맹민재[†] · 정준기^{*}

(2003년 12월 29일 접수, 2004년 3월 31일 심사완료)

The Characteristics of the Milling Tool Deflection According to the Variation of Helix Angle

Min Jae Maeng and Joon Ki Chung

Key Words: End Milling(엔드밀가공), Deflection(변위), Strain Gauge(스트레인게이지), Helix Angle(헬릭스각), Tool Dynamometer(공구동력계), Laser Vibrometer Controller(레이저진동 측정장치)

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. Several studies were devoted to the end mill deflection and its effects, notably, providing a useful insight into the problem. Although the deflection affects adversely the accuracy, the flexibility of the cutter is beneficial in attenuating the overload in a sudden transient situation, as well as in attenuating chatter. 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.

1. 서론

최근 현대 산업사회에서는 단기간 내에 생산품의 품질향상과 고정밀도를 요구하고 있어, 이에 따른 정확한 절삭과정과 이론적 고찰은 필수 요구조건이다. 특히 금형, 항공기 및 조선 등에 사

용되고 있는 기계 부품에 대한 엔드밀 작업은 정확도가 절실히 요구되고 있는 추세이다. 엔드밀 가공오차의 발생원인은 공구마멸, 런아웃, 채터, 처짐 등에 기인하며, 이들 가운데 공구처짐은 포켓, 홈 및 코너 가공에 가늘고 긴 공구를 사용함으로써 가공오차 발생의 주원인이다. 특히 엔드밀 공구는 자체 형상이 가늘고 긴 형태이므로 그에 따른 강성부족으로 인하여 절삭가공 중 발생하는 절삭력에 의해 공구처짐이 발생된다. 또한 엔드밀 공구가 회전함에 따라 칩의 두께가 계속 변할 뿐 아니라⁽¹⁾ 단속절삭이 이루어지기 때문에 절삭력은 시간에 따라 변화하는 특징이 있다.^(2~3) 이런 특징 때문에 공구처짐을 줄이기 위해서는 고속절삭과 고강성 공구를 사용해야 하지만, 고강성 공구는 절삭력이 수시로 변화하는 엔드밀

[†] 책임저자, 회원, 동서울대학 기계공학부

E-mail : mjmaeng@dsc.ac.kr

TEL : (031)720-2142 FAX : (031)720-2261

^{*} 회원, 홍익대학교 기계·시스템디자인공학과

작업에서 고유의 취성 때문에 파손이 될 수 있어, 주로 평면작업이나 정삭작업에만 제한적으로 사용하고 있다. 고속도강 형태의 공구는 장시간 고속 절삭시 공구마멸이 쉽게 됨으로써 절삭속도를 높이는 것은 생산성 증대 및 가공 효율적인 면에서는 한계가 있다.

엔드밀 공구처짐은 표면 정밀도를 저하시키므로 Kline⁽⁴⁻⁵⁾은 공구처짐을 예측하기 위하여 엔드밀 공구를 단순보로 가정하여 절삭력에 의한 표면 정밀도를 예측하였고, 외력을 집중하중으로 단순화시켜 절삭력과 보의 처짐으로 해석하였다. Kops⁽⁶⁾는 FEM해석에 엔드밀의 유효직경을 적용하였으나, 다양한 공구형상에는 적용의 한계가 있다. Smith⁽⁷⁾는 시스템의 동적거동을 예측하기 위한 해석모델을 제시 한 바도 있다. 이와 같이 엔드밀 절삭과정에 대한 연구는 절삭력 변화에 따른 표면 정밀도를 정확하게 예측하고자 하는 데 그 목적이 있다. 그러므로 표면조도에 결정적인 영향에 미치는 공구처짐 모델에 대한 연구가 필요하다. 현재의 다양한 공구형상, 특히 헬릭스각의 변화에 따른 공구변위 예측은 기존의 FEM해석방법(단면형상의 유효 공구직경을 일정하게 가정하고 분석하는 방법)으로는 정확한 해석이 불가능하다.

본 연구에서는 엔드밀 작업중 공구 자유단의 변위를 예측하기 위하여 정적 및 동적상태에서 변위를 각각 실험과 FEM해석에 의한 방법으로 비교·분석하여 자유단에서의 처짐을 예측하고자 한다. 또한 정적상태에서의 공구처짐을 확인하기 위해서 실제와 동일한 단면형상을 모델링하고, 이를 FEM해석에 의한 정적해석 방법을 통해 비교·분석하였다. 그리고 동적상태에서의 절삭가공 중 작용하는 힘을 실험에 의해 측정하고, 측정된 힘을 FEM해석에 적용하여 엔드밀 가공중 정확하게 측정할 수 없는 공구 자유단의 변위를 예측하고자 한다. 동시에 과도 부분의 변위는 레이저 측정장치를 이용하여 검출한다. 또한 공구의 수명과 피삭재의 표면 정밀도에 영향을 주는 공구 자유단에서 발생하는 비틀림각 및 응력분포의 경향도 도출하고자 한다.

2. 이론적 고찰

2.1 공구굽힘모델

엔드밀 가공중 절삭력에 의한 처짐은 주로 엔드밀 공구의 횡방향으로 작용된다. 이는 절삭 가공중 외력에 의한 하중을 집중하중으로 단순화함

에 따라 설명 될 수 있다. 이때 엔드밀은 절삭저항에 의하여 처짐이 발생하는 데 그 처짐에 의해서 공구의 방향이 순간 이동하여 위치가 변하게 된다. 이때 변위 되는 모델은 Fig. 1과 같이 집중하중을 받는 외팔보로 가정할 수 있다.⁽⁴⁾ 외팔보 자유단에 집중하중(P=Fy)가 작용할 때, 자유단으로부터 임의의 거리에 있는 임의 단면에서의 변형은 굽힘 모우멘트에 의하여 결정된다.

$$EI \frac{d^2y}{dL_e^2} = F_y L_e \tag{1}$$

식 (1)을 L_e 에 관해서 두 번 적분하면 다음과 같이 된다.

$$EI \frac{dy}{dL_e} = \frac{F_y L_e^2}{2} + C_1$$

$$EIy = \frac{F_y L_e^3}{6} + C_1 L_e + C_2$$

여기서, 적분상수 C_1 과 C_2 문제의 경계조건을 만족하면 $L_e=L$ 에서 $\frac{dy}{dL_e} = 0$ 이므로 $C_1 = \frac{F_y L^2}{2}$

$$y = 0 \text{이므로 } C_2 = \frac{F_y L^3}{3}$$

$$\frac{dy}{dL_e} = \frac{F_y}{2EI_y} (L_e^2 - L^2)$$

$$dy = \frac{F_y}{6EI_y} (L_e^3 - 3L^2 L_e + 2L^3) \tag{2}$$

외팔보에 가해진 Y축 방향 엔드밀의 변위는 식 (2)로 표현된다. 여기서, dy 는 Y축 엔드밀의 변위, F_y 는 Y축 절삭력, I_y 는 엔드밀의 2차 관성 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 유효지름을 환산한 값이다. 대부분 $0.7 \sim 0.8Do$ (Do =날부지름)를 쓰는데 다양한 공구 형상에서는 한계가 있다고 판단된다.

3. 정적실험 및 해석

3.1 실험장치 및 방법

Fig. 2는 정적일 때 엔드밀의 변위를 측정하기

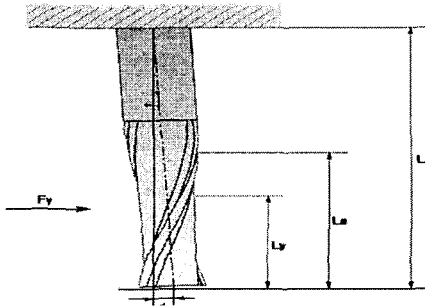


Fig. 1 Schematic diagram of end mill cutter deflection

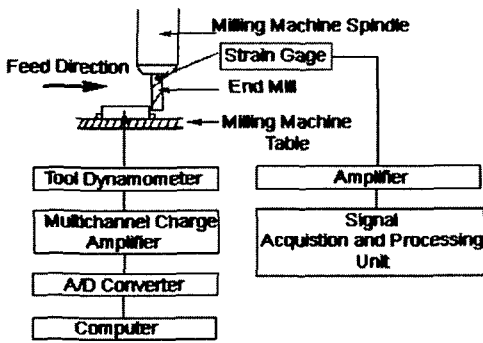


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

위해 CNC 머시닝센터(DAEWOO, Mynx 500)에 부착한 실험장치의 구성도이다. 절삭가공과 동일한 조건을 만들어 주기 위해 엔드밀을 주축 스피indle에 장착하고, 공구 자유단 지점에서 이송방향으로 이동시켰을 때 공구 자유단의 변위와 이때 작용하는 힘을 공구동력계(KISTLER 9257B, Amplifier:5019A)로 측정하였다. 그리고 공구 자유단으로부터 38mm위치, 즉 과도 부분의 변위를 측정하기 위해 스트레인 게이지(CAS A11600-A, 120 Ω)를 그 위치에 부착하여 측정하였다. 또한 엔드밀 변위를 인위적으로 주기 위한 접촉점은 날 끝부분을 기준으로 하였다. 절삭공구는 2날 솔리드형 고속도강 엔드밀을 사용하였다.

3.2 FEM 해석방법

엔드밀은 경사각, 경사면, 여유각 및 밀날홈 등의 요소로 구성되어 있으므로 일정한 원형대로 해석할 수 없다. 라운딩된 모서리 및 날 부위와 샹크(shank) 부분이 만나는 과도부분에 라운딩을

제거해서 평면처리하여 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 관성 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 치수파악과 단면 형상을 계측하였다. 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. 3은 헬릭스각 30° 일 때 이송방향 힘의 증가에 따른 공구의 끝단과 끝단으로부터 38mm위치에서의 변위에 대한 실험과 FEM 해석결과를 나타낸다. Fig. 3에서와 같이 이송방향 힘이 증가할수록 공구변위가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 38mm위치의 변위는 실험과 FEM 해석결과가 서로 유사한 경향을 나타낸다. 그러나 공구의 끝단 변위는 이송방향 힘의 증가에 따라 400N에서는 실험과 FEM 해석결과와 차이가 나타난다. Fig. 4는 헬릭스각 40° 일때 이송방향 힘의 증가에 따른 공구의 끝단 및 끝단으로부터 38mm위치에서의 변위에 대한 각각의 실험과 FEM 해석결과를 나타낸다. Fig. 4에서와 같이 이송방향 힘이 증가할수록 공구변위가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 38mm위치의 변위는 실험과 FEM 해석결과가 헬릭스각 30°의 경우와 유사한 경향을 나타낸다. 그러나 공구의 끝단 변위는 이송방향 힘의 증가에 따라 실험과 FEM 해석결과와 차이가 200N부터 나타나기 시작한다. 공구 끝단의 변위는 실험에 비해 FEM 해석결과가 크게 나타난다. 그 이유는 날 부위 밀날 홈 부분이 평면 처리되어 밀날 홈을 고려하지 못한 것이 주요인으로 사료된다.⁽⁹⁾ 또한 FEM 해석시 힘을 가할 때 공구동력계의 Z축 방향의 폭 만큼의 면적을 고려하지 못한 때문이라고 할 수 있다.

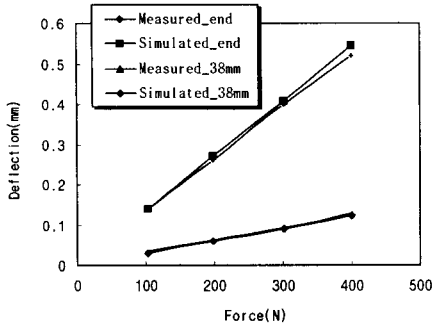


Fig. 3 Deflection versus Force (helix angle 30°)

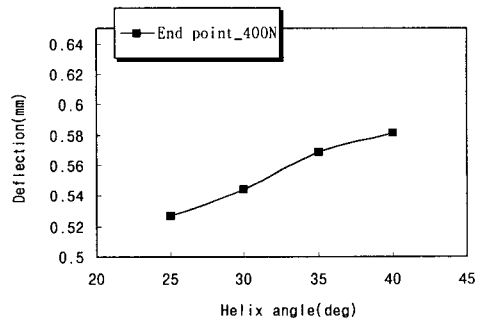


Fig. 5 Deflection versus helix angle by FEM simulation

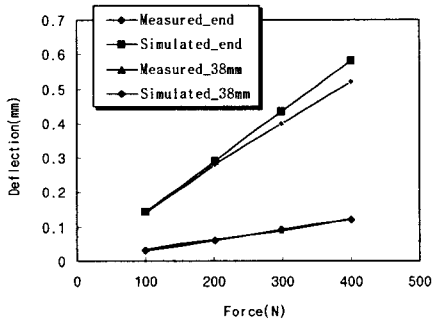


Fig. 4 Deflection versus Force (helix angle 40°)

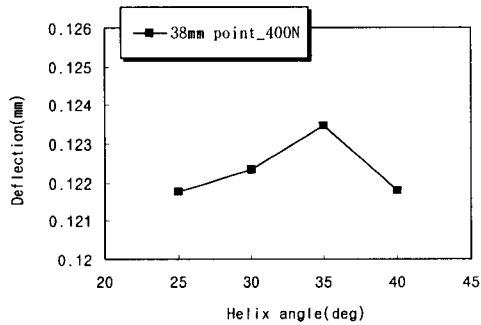


Fig. 6 Deflection versus helix angle by FEM simulation

Fig. 5는 헬릭스각의 변화에 대한 공구 끝단의 변위를 FEM 해석결과로 해석조건은 절삭날 끝단의 수직인 방향으로 400N의 힘을 작용시켰다. 이에 대한 해석결과는 헬릭스각이 증가할수록 공구 자유단의 변위는 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 헬릭스각의 변화에 대한 끝단으로부터 38mm위치의 변위를 FEM 해석결과로 해석조건은 절삭날 끝단의 수직인 방향으로 400N의 힘을 작용시켰다. 해석결과는 헬릭스각이 증가함에 따라 변위가 증가하다가 헬릭스각 40에서는 변위가 감소하는 결과를 알 수 있다. 40에서 감소하는 이유는 축방향으로 꼬임 정도가 360°정도 가까이 되면 응력분포가 감소하여 끝단으로부터 38mm위치의 변위는 감소하는 것으로 사료된다. 다른 조건, 즉 100, 200, 300, 400(N) 하에서도 정성적으로 유사한 결과를 얻었다.

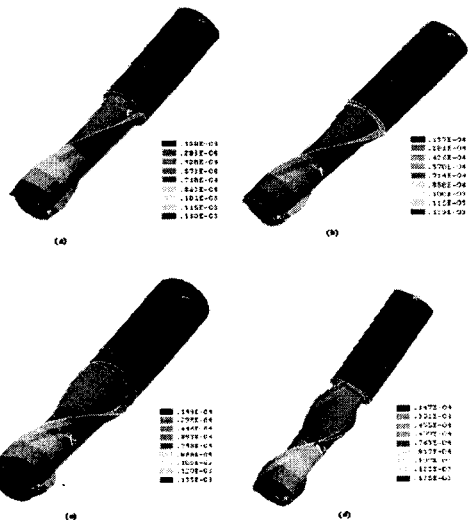


Fig. 7 X direction deflection by FEM simulation ((a)25°, (b)30°, (c)35°, (d) 40°)

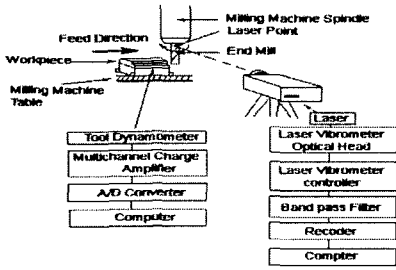


Fig. 8 Schematic diagram of experimental apparatus

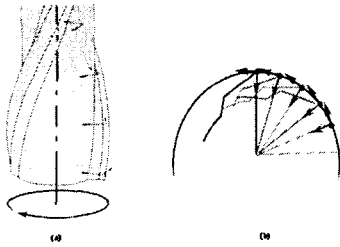


Fig. 9 Analysis of end milling dynamic state in:(a)whole tool state (b)turning state of infinitesimal cutting edge

Fig. 7은 헬릭스각의 변화에 대한 이송방향의 FEM 해석결과로 해석조건은 절삭날 끝단의 수직한 방향으로 400N의 힘을 작용시켰다. 끝단의 변위는 헬릭스각이 증가할수록 변위가 증가하고, 끝단으로부터 38mm위치의 변위는 헬릭스각 40°에서 감소하는 것을 FEM 해석결과로부터 확인할 수 있다.

4. 동적 실험 및 해석

4.1 실험장치 및 방법

Fig. 8은 엔드밀 가공 중에 변위를 측정하기 위한 실험장치의 구성도이다. 실험장치는 비접촉식 레이저 측정기(Mach-Zehnder, 광원 2.3mW, 파장 633nm He-Ne 레이저)를 사용하여 엔드밀 과도부분의 변위를 측정하였다. 동시에 공기동력계로 각각의 방향에 따른 절삭력을 측정하였다. 실험은 헬릭스각 30°, 40°, 엔드밀(ϕ 12mm), 절삭속도 V=20, 25m/min, 이송속도 f=60, 80, 100, 120mm/min, 축방향 절삭깊이 $d_a=2$ mm, 반경방향 절삭깊이 $d_r=5$ mm에 대하여 총 16가지의 절삭조건으로 시험편(SM45C)을 하향절삭하면서 수행하였다.

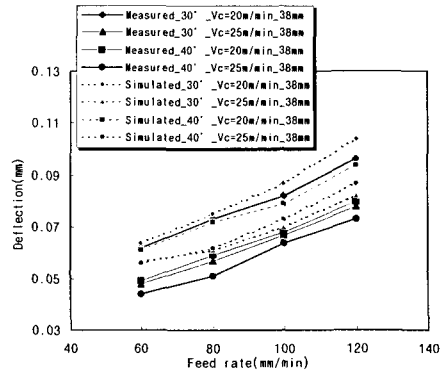


Fig. 10 Comparison of measured and simulated deflections

4.2 FEM 해석방법

Fig. 9는 동적 해석과정을 나타내고 있다. 미소 절삭날이 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 된다. 또한 사이클은 시간과 절삭력의 그래프이므로 시간에 따라 변하는 힘에 대하여 임의의 질점의 변위를 해석하는 과도 해석이다. 그러므로 힘이 변하는 지점의 사이클을 하나의 하중 단계로 볼 수 있기 때문에 해석 절차는 다단계 절차를 따른다. 축방향 절삭깊이가 크면 하중구간에서 임의의 질점이 헬릭스각 선도를 따라 올라간다. 하지만 축방향의 절삭깊이가 매우 적은 양이면 공구선단의 극히 일부분만 절삭에 참여함으로 시간에 따라 절삭 각도만 바꾸면서 과도 해석하였다.

4.3 해석 결과

Fig. 10은 엔드밀 가공 중에 끝단으로부터 38mm 위치의 변위에 대한 실험과 FEM 해석결과를 나타낸다. 엔드밀 변위에 영향을 미치는 헬릭스각, 절삭속도 및 이송속도를 절삭변수로 사용하였다. Fig. 10에서와 같이 헬릭스각이 30°, 절삭속도 20m/min일 때 가장 큰 변위가 나타나며, 헬릭스각이 40°, 절삭속도 25m/min일 때 가장 작은 변위가 나타난다. 전체적으로 FEM 해석의 경우가 실험의 결과보다 변위가 다소 증가하는 경향을 나타낸다. 이러한 결과는 진동 및 채터 현상 등을 해석시 고려하지 못한 것으로 사료된다.⁽¹⁰⁾

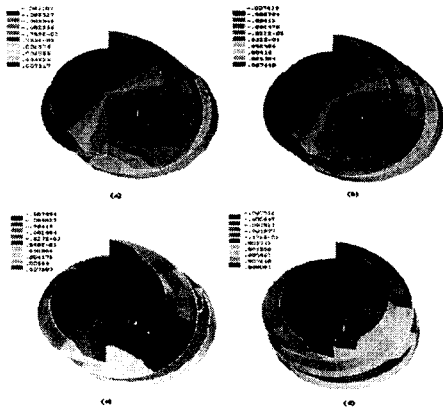


Fig. 11 Y direction rotation by helix angle ((a)25°, (b)30°, (c)35°, (d)40°)

또한 FEM 해석과정에서 특정 요소 질점에 대한 정확한 집중하중 표현에 한계가 있다고 판단된다. 이상의 결과를 종합적으로 비교하면 정적상태의 공구변위 경향과 유사하다. 따라서 엔드밀 가공 중에 공구 끝단 및 38mm위치의 변위를 FEM 해석으로 예측할 수 있다.

Fig. 11은 헬릭스각의 변화에 대한 비틀림 각도 및 분포를 나타낸다. 절삭과정과 동일한 조건을 부여하기 위해 날 부위에 특정 힘(X축, Y축에 각각 100N)을 동등하게 주고 그 결과를 검토보았다. 또한 측정결과는 실린더 좌표계로 엔드밀의 중심축을 중심점으로 변환하여 측정하였다. 각각 헬릭스각이 25°, 30°, 35°, 40°일 때 0.407774°, 0.426796°, 0.430119°, 0.520990°의 비틀림 각이 나타났다. 따라서 헬릭스각이 커질수록 비틀림 각이 증가하고, 비틀림 응력분포는 헬릭스각이 40°에서 감소하는 경향을 나타낸다. 이 경향은 38mm위치의 변위 경향과 일치한다.

5. 결론

엔드밀 가공시 헬릭스각이 공구변위에 미치는 영향을 검토하기 위하여 정적과 동적상태 경우에 대하여 실험 및 FEM 해석결과를 비교하여 다음의 결론을 얻었다.

(1) 엔드밀 끝단의 변위는 헬릭스각이 증가할수록 점진적으로 증가시킨다.

(2) 끝단으로부터 38mm위치의 변위는 헬릭스각이 25°, 30°, 35°경우는 비례적으로 증가를 하고, 40°에서는 30°의 경우보다 감소한다.

(3) 엔드밀의 비틀림각은 각각 헬릭스각이 25°, 30°, 35°, 40°일 때 0.407774°, 0.426796°, 0.430119°, 0.520990°의 비틀림각으로 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 비틀림 분포는 40°에서 뚜렷하게 감소함을 확인하였다.

(4) 엔드밀 가공중에 공구 처짐에 따른 변위는 실험과 FEM해석 결과 비교시 정성적으로 일치함을 확인할 수 있다.

참고문헌

- (1) Marellotti, M. E., 1941, "An Analysis of the Milling Process," *Transactions of the ASME*, Vol. 63, pp. 677~700.
- (2) Tlusty, J., and Macneil, P., 1975, "Dynamics of Cutting Force in End Milling," *Annals of the CIRP*, Vol. 24, No. 1, pp. 21~25.
- (3) Tlusty, J. and Elbestawi, M., 1979, "Constraints in Adaptive Control with Flexible End Mills," *Annals of the CIRP*, Vol. 28, No. 1, pp. 253~255.
- (4) Kline, W. A., Devor, R. E. and Shareef, I. A., 1982, "The Prediction of Surface Accuracy in End Milling," *Transactions of the ASME*, Vol. 104, pp. 272~278.
- (5) Kline, W. A. and Devor, R. E., 1983, "The Effect of Runout on Cutting Geometry and Force in the Milling," *Int. J. MTRD*, Vol. 23, No. 2, pp. 123~140.
- (6) Kops, L. and Vo, D., 1990, "Determination of the Equivalent Diameter of End Mill based on Its Compliance," *Annals of the CIRP*, Vol. 39, No. 1, pp. 93~96.
- (7) Smith, S. and Tlusty, J., 1991, "An Overview of Modeling and Simulation of the Milling Process," *Transactions of the ASME*, Vol. 113, pp. 169~175.
- (8) Devor, R. E. and Sutherland, J., 1986, "An Improved Method for Cutting Force and Surface Error Prediction in Flexible End Milling System," *Transactions of the ASME*, Vol. 108, pp. 269~279.
- (9) Kenichi, K., Mitsushige, F., Katsuhiko, A. and

- Tomio, S., 1994, "Analytical Prediction of Cemented Endmill," *Transactions of the JSPE*, Vol. 60, No. 6, pp. 822~826.
- (10) Ismail, F. and Tlusty, J., 1983, "Special Aspects of Chatter in Milling," *Transactions of the ASME*, Vol. 105, pp. 24~32.
- (11) Lee, S. L., Maeng, M. J. and Chung, J. K., 1999, "Tool Fracture Detection by End Mill Deflection," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 8, No. 2, pp. 100~107.

- 바로 잡음 -

대한기계학회논문집 A권, 제28권 제5호, pp. 654~661, 2004(논문제목 : '연속드로잉에서 아이어링과 리드로잉의 복합공정,' 저자 : '정준기·조웅식·이택성') 중 654쪽의 저자명 아래에 논문접수 및 심사완료일자 표기가 누락되었기에 다음과 같이 바로잡습니다.

'(2003년 12월 29일 접수, 2004년 3월 26일 심사완료)'
