

신경망을 이용한 엔드밀의 정적 강성 결정

이 상 규*, 고 성 림**

Determination of the Static Rigidity of the End Mill Using Neural Network

Sang-Kyu Lee*, Sung-Lim Ko**

ABSTRACT

The deflection of an end mill is very important in machining process and cutting simulation because it affects directly workpiece accuracy, cutting force, and chattering. In this study, the deflection of the end mill was studied both experimentally and by using finite element analysis. And the moment of inertia of cross sections of the helical end mill is calculated for the determination of the relation between geometry of radial cross section and rigidity of the tools. Using the Bernoulli-Euler beam theory and the concept of equivalent diameter, a deflection model is established, which includes most influences from tool geometry parameters. It was found that helix angle attenuates the rigidity of the end mill by the finite element analysis. As a result, the equivalent diameter is determined by tooth number, inscribed diameter ratio, cross sectional geometry and helix angle. Because the relation between equivalent diameter and each factor is nonlinear, neural network is used to decide the equivalent diameter. Input patterns and desired outputs for the neural network are obtained by FEM analysis in several case of end milling operations.

Key Words : End Mill(엔드밀), Rigidity(강성), Equivalent Tool Diameter(유효 공구 직경), FEM(유한요소해석), Center of Force(힘의 작용점), Deflection Model(처짐모델), Helix Angle(헬릭스 각), Moment of Inertia of Cross Section(단면 2차 모멘트), Neural Network(신경 회로망)

1. 서론

엔드밀 가공은 금형 제작, 항공기 구조물의 가공을 비롯한 많은 산업분야에 이용되고 있다. 점차 정밀가공의 필요성과 생산성 증대에 대한 요구가 증대됨에 따라, 파

트 프로그래머는 표면정밀도와 표면거칠기를 허용공차 이내로 유지하고 공구의 파손을 방지하면서 가공시간을 단축할 수 있는 최적 절삭조건을 선정해 주어야 한다. 이와 같은 절삭조건 선정에 위해서는 엔드밀의 절삭과정에 대한 효율적인 시뮬레이션을 수행할 수 있어야 하는

* 건국대학교 대학원 기계설계학과
 ** 건국대학교 기계설계학과

데, 그러기 위해서는 절삭력 예측 알고리즘, 치짐 예측 알고리즘, 표면 오차 예측 알고리즘 등의 성능이 매우 중요하다.

특히 절삭력에 의하여 발생하는 공구의 치짐은 가공 정밀도에 큰 영향을 줄 뿐 아니라, chatter의 발생 요인이 되기 때문에 시뮬레이션 결과에 직접적인 영향을 준다. 일반적으로, 공구의 치짐이 발생하게 되면 피삭재의 표면 정밀도는 저하되지만⁽¹⁾, 공구의 치짐으로 인한 칩두께의 변화에 의하여 순간 절삭력의 크기와 chatter의 발생은 감소하는 경향을 보인다⁽²⁾. 따라서 엔드밀의 치짐량을 예측하고 가공정밀도에 미치는 영향을 분석하기 위한 노력이 많은 연구자에 의하여 시도되었다. 엔드밀의 치짐을 고려한 절삭 시뮬레이션 연구결과는 매우 많지만, 대표적으로, 공구를 강재로 가정하고 칩과 공구 사이에서 발생하는 미소 각변위를 이용하여 표면정밀도를 예측하거나⁽³⁾, 엔드밀을 단순보로 가정하여 절삭력에 의한 공구의 치짐으로부터 표면정밀도를 예측한 결과가 있고⁽⁴⁾, 다양한 형태의 엔드밀에 의한 3차원 표면형성 예측을 위하여 FEM 해석을 통하여 공구의 강성을 예측한 결과가 있다⁽⁵⁾. 그리고, 절삭력의 예측시 공구의 치짐에 의한 칩두께의 변화를 고려함으로써, 보다 신뢰성있는 예측 결과를 얻을 수 있다는 보고가 있다.⁽⁶⁾

이와 같은 엔드밀의 절삭과정에 대한 연구는 절삭력과 그에 따른 표면정밀도의 저하를 보다 정확하게 예측하고자 하는 목적을 가지고 있기 때문에, 시뮬레이션의 결과에 결정적인 영향을 미치는 공구의 치짐모델의 수립을 위한 많은 연구가 수행되었다.

이를 위해서는 적절한 치짐 모델의 수립과 함께 공구의 강성에 대한 적절한 가정이 매우 중요하다. 지금까지 공구의 형상과 강성의 관계에 대한 해석을 위하여, Oxford가 행한 드릴 단면 윤곽에 내접하는 최대원에 의한 강성 비교 연구⁽⁷⁾와 Tlusty의 콜렛부에서 발생하는 치짐량을 일정한 계수로 가정한 모델⁽⁸⁾, Tlusty가 행한 4날짜리 엔드밀에 대한 공구 직경에 내접하는 정사각형으로의 근사⁽⁹⁾, Kops의 FEM 해석에 의한 유효직경의 선정⁽⁹⁾, Fujii의 공구 단면의 2차모멘트에 의한 치짐량 모델의 수립⁽¹⁰⁾과 같은 연구가 수행되었다. 그러나 최근에 초경합금 공구가 널리 적용되면서, 공구의 단면형상과 날부, 헬릭스 각이 매우 다양하게 변화하는 추세이기 때문에 기존의 특정한 엔드밀 형상으로부터 얻은 유효직경 선정 결과를 아무런 수정없이 사용할 경우에는 정밀한 절삭 시뮬레이션 결과를 기대할 수 없다.

본 연구에서는 공구의 형상변화에 따른 공구강성을 보다 정확히 예측하기 위하여 공구의 형상을 대표하는 몇 개의 매개변수와 유효공구직경과의 관계를 해석한다. 이를 위하여 우선 공구의 단면 형상 정보를 이용하여 단면 2차 모멘트를 계산하고, 날부의 축 직각 단면에서 발생하는 강성의 이방성에 대하여 해석하였다. 또 헬릭스 각과 유효직경과의 관계를 분석하기 위하여 다양한 공구형상에 대한 유한요소해석을 수행하였다.

이러한 결과를 이용하여 매개변수의 변화에 따른 공구 강성의 영향을 고려할 수 있도록, 헬릭스 각, 공구 날부의 길이, 생크부의 길이, 탄성계수, 절삭력 중심, 유효직경, 공구 날부의 단면 형상을 매개변수로 하는 치짐 모델식을 수립하였다. 공구의 형상 매개 변수와 유효직경 사이에는 매우 복잡한 비선형 관계가 존재하므로, 신경망 회로를 이용하여 유효직경을 예측한다. 이렇게 수립된 신경망을 이용한 치짐모델을 이용하면 다양한 공구형상의 엔드밀에 대한 정확한 공구강성을 예측할 수 있다. 제시된 모델의 타당성을 검증하고, 스피들부의 치짐의 영향을 검토하기 위하여 시판중인 공구를 이용한 정적 치짐 실험을 수행하고 그 결과를 분석하였다.

2. 사각형 요소를 이용한 단면 2차 모멘트의 계산

엔드밀의 복잡한 단면 형상으로 인하여 날부에 대한 단면 2차 모멘트를 해석적으로 계산하는 것은 지나치게 복잡한 계산을 필요로 한다. 따라서 본 연구에서는 엔드밀의 단면을 작은 미소단면으로 나누고, 각각의 미소단면을 구성하는 사다리꼴에 대한 단면 2차 모멘트를 계산하고 그 결과를 모두 합하여 전체 단면에 대한 단면 2차 모멘트를 구한다. 이와 같이 수치해석적인 방법을 사용할 경우 단면 2차 모멘트에 대한 계산이 쉽고 빠를 뿐만 아니라 공구의 이방성에 대한 해석을 편리하게 수행할 수 있다는 장점이 있다.

엔드밀의 단면형상은 제작상의 제한요인으로 인하여 단면형상이 매우 제한적이며⁽¹¹⁾, 적당한 양의 점을 이용하여 충분히 외곽선의 형태를 표현할 수 있다. Fig.1의 왼쪽 그림과 같이 엔드밀의 외곽선 상에 위치하는 연속된 두 개의 점 P_i, P_{i+1} 으로부터 x 축상으로 y 축에 평행하는 두 개의 직선을 그을 수 있다. 이제 이렇게 얻은 두 직선과 P_i, P_{i+1} 를 잇는 선분, x 절편 x_i, x_{i+1} 를 잇는 선분을 각각의 변으로 갖는 사다리꼴을 그릴 수 있다. 얻어진 사다리꼴은 점 $P_i, P_{i+1}, x_i, x_{i+1}$ 를 꼭지점으로 하는 날부의 단면 2

차 모멘트의 계산을 위한 미소요소로 생각할 수 있다.

얻어진 임의의 형태를 갖는 사다리꼴 미소요소에 대하여 Fig.1의 오른쪽 그림과 같이 사각형과 삼각형으로 분리하여 생각하면, 하나의 일반식으로 모든 형태의 미소요소에 대한 단면 2차 모멘트를 계산할 수 있다. 평행축 정리를 이용하면, i 번째 미소요소의 단면 2차 모멘트, $I_{yy,i}$ 는 (1)식과 같이 구해진다. 식 (1)에서 D 는 삼각형 요소의 도심으로부터 x 축까지의 거리이고, b 는 삼각형 요소의 너비이다. h_1 은 삼각형 요소의 높이이고, h_2 는 사각형 요소의 높이이다.

$$I_{yy,i} = \frac{bh_1^3}{36} + \frac{bh_1D^2}{2} + \frac{bh_2^3}{3} \quad (1)$$

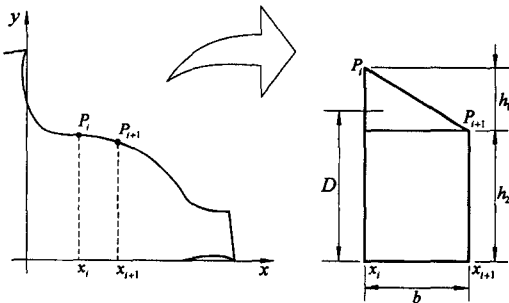


Fig. 1 Direct Calculation of Moment of Inertia

두 개의 점과 x 축상의 법선으로 이루어진 사다리꼴은 형태에 관계없이 모두 (1)식을 이용하여 단면 2차 모멘트를 계산할 수 있으나, 만일 점 P_i 와 점 P_{i+1} 의 y 축 좌표값의 부호가 반대일 경우에는 점 $P_i, P_{i+1}, x_i, x_{i+1}$ 를 꼭지점으로 하는 사다리꼴을 그릴 수 없고 두 개의 삼각형이 얻어진다. 이 경우에는, 두 점을 지나는 직선과 x' 축과의 교점을 구하여 두 개의 삼각형 요소로 나누어 생각한다. 이렇게 얻어진 삼각형 요소는 Fig.1의 오른쪽 그림에 나타난 사각형 요소에서 높이 h_2 가 0인 특수한 경우로 생각할 수 있으므로, (1)식을 그대로 사용하여 삼각형 요소에 대한 단면 2차 모멘트를 계산한다.

식 (1)과 같이 엔드밀의 외곽선을 이용하여 얻어진 미소요소에 대한 단면 2차 모멘트 계산결과로부터 엔드밀의 전체 면적에 대한 단면 2차 모멘트를 구하기 위해서는 공구를 Fig.2와 같이 x 축상에 중첩되는 미소 요소로 생각할 필요가 있다. 엔드밀의 외곽선 상의 점 P 를 시계방

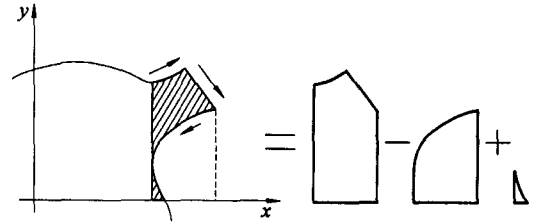


Fig. 2 Superposition of Moment of Inertia in Each Element

향으로 연속하여 나타낸다고 할 때, 식 (2)와 같이 점 P_i, P_{i+1} 가 오른쪽 방향(R)으로 진행하면 더해 주고, P_i, P_{i+1} 가 왼쪽 방향(L)으로 진행할 때는 빼줌으로써 공구 전체에 대한 단면 2차 모멘트를 계산한다. 만일 y 축 좌표값이 음수일 때에는 식 (2)의 우변의 부호를 반대로 바꾸어 계산하면 된다.

$$I_{yy} = \sum_{i=1}^N I_{yy,i}(R) - \sum_{i=1}^N I_{yy,i}(L) \quad (2)$$

식(1)과 식(2)를 이용하여 Table 1과 같은 2날, 4날을 갖는 공구의 날부에 대하여 단면 2차 모멘트를 계산하였다. 사용된 공구는 OSG사의 제품으로서 규격은 Table 1과 같다.

Table 1. Geometrical Parameter of End Mills

No.	Diameter of Tooth (mm)	Diameter of Shank (mm)	Helix Angle	Length of cutter(mm)	No. of tooth	Total Length (mm)
1	8	10	30°	36	2	75
2	8	10	30°	36	4	75
3	10	10	30°	46	2	90
4	10	10	30°	46	4	90
5	12	12	30°	55	2	105

단면 2차 모멘트의 계산에 필요한 날부의 단면을 측정하기 위하여 Table 1의 엔드밀을 절단하여 연삭기로 평면가공을 한 후, 형상 프로젝터를 이용하여 단면의 윤곽점을 측정하였다. 이 때 형상의 정확성을 유지하기 위하여 각 측정점 간의 거리는 0.1mm 이내로 설정하였다. 대표적인 예로서 Table 1의 3,4번 엔드밀에 대하여 날부의 단면을 측정한 예를 Fig.3과 같이 나타내었다. Fig.3에 나타난 엔드밀의 단면형상으로부터, 2날 엔드밀의 경우에는 2차 모멘트가 이방성을 가지고 있음을 직관적으로 알 수 있다. 그러나 Fujii에 따르면, 3날 이상의 엔드밀에

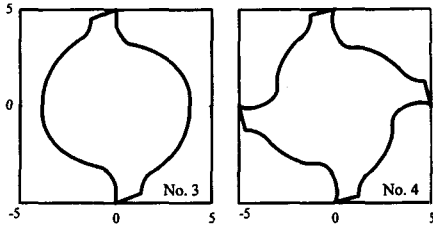


Fig. 3 Representation of Cross Sections in End Mill No.3 and No.4

서는 단면 형상의 대칭성으로 인하여 단면 2차 모멘트의 이방성이 존재하지 않는다⁽¹⁰⁾.

Fig.4는 본 연구에서 제시한 단면 2차 모멘트 계산 알고리즘을 이용하여 Table 1의 공구에 대하여 단면을 10°씩 회전시키면서 2차 모멘트를 계산한 결과를 그래프로 나타낸 것이다. Fig.4에서 2날짜리 엔드밀의 단면 2차 모멘트는 180°를 주기로 하여 최대값과 최소값이 약 ±20% 내외의 큰 폭으로 변화하는 것을 알 수 있다. 실제 공구에서는 헬릭스각을 따라 단면 2차 모멘트의 최소값과 최대값이 각 방향으로 중첩되므로 강성의 이방성의 영향이 어느 정도 상쇄되지만, 공구의 길이가 짧을 때에는 헬릭스각의 영향이 상대적으로 감소하게 되어, 2날 엔드밀에 존재하는 이방성의 영향을 무시할 수 없을 것으로 생각된다. 또 4날짜리 엔드밀의 경우에는 단면의 방향에 따른 이방성이 존재하지 않음을 검증할 수 있었다. 얻어진 단면 2차 모멘트 계산 알고리즘은 단면의 이방성 해석뿐만 아니라, 헬릭스각의 영향을 제외한 공구의 강성을 쉽고 정확하게 계산하는데 이용될 수 있다.

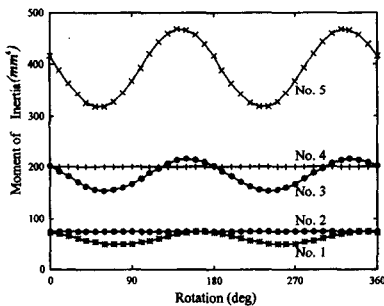


Fig. 4 Comparison of Moment of Inertia

3. 처짐모델의 수립

엔드밀은 날부와 샙크부로 이루어져 있고, 날부와 샙크

부 사이에는 날부의 복잡한 형상으로부터 원형봉으로 변화하는 과도구간이 존재한다. 이와 같은 복잡한 엔드밀의 처짐량을 단순한 처짐식을 이용하여 예측하기 위하여, 엔드밀을 여러 개의 서로 다른 유효직경을 갖는 원형봉이 연결된 보로 가정하면, Fig.5와 같은 모델로 표현할 수 있다. 이 때, 유효직경이란 계산의 편의를 위하여 도입한 개념으로서, 동일한 경계 조건하에서 공구와 동일한 최대 처짐량을 갖는 원형봉의 직경으로 정의한다. Fig.5에서 집중하중 F 가 고정단으로부터 cf_x 만큼 떨어진 곳에 작용하고 있을 때, 각 요소의 점 $Q_i(x_i, 0)$ 에서의 처짐각 ϕ_i (rad) 및 처짐량 y_i 는 점 $Q_{i-1}(x_{i-1}, 0)$ 를 원점으로 하여 식 (3), (4)와 같이 계산된다. 식 (4)에서 임의의 거리 x 에서의 날부의 처짐량(y_c)을 계산하려 할 때에는 x_i 항에 x 를 대입하면 된다.

$$\phi_i = \frac{F}{2EI} \{ 2(cf_x - x_{i-1})(x_i - x_{i-1}) - (x_i - x_{i-1})^2 \} \quad (3)$$

$$y_i = \frac{F}{6EI} \{ 3(cf_x - x_{i-1})(x_i - x_{i-1})^2 - (x_i - x_{i-1})^3 + < x_i - cf_x >^3 \} \quad (4)$$

얻어진 각 요소의 처짐량과 처짐각을 이용하여 고정점 $Q_0(0, 0)$ 를 원점으로 하는 점 $Q_i(x_i, 0)$ 에서의 처짐각과 처짐량은 식(5)와 식(6)을 이용하여 각각 얻을 수 있다⁽¹⁰⁾.

$$\Phi_i = \sum_{j=1}^i \phi_j \quad (5)$$

$$Y_i = \sum_{j=1}^i \{ y_j + (x_j - x_{j-1})\Phi_{j-1} \} \quad (6)$$

이렇게 유도된 식 (6)을 사용하여 처짐량을 구하기 위해서는 먼저 날부의 유효직경을 결정할 필요가 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 공구 단면 형상과 헬릭스각에 따른 유효직경의 경향을 분석한다.

Fig.4의 공구의 단면형상으로부터 얻은 단면 2차 모멘트 값은 물리적으로 헬릭스각이 0°인 엔드밀의 날부의 단면 2차 모멘트를 의미한다. 2날짜리 엔드밀의 날부에는 공구의 강성에 이방성이 존재하지만, 공구의 길이가 충분히 길고 헬릭스각이 존재한다면, 헬릭스각의 영향에 의하여 공구의 이방성의 영향이 중화된다고 생각할 수 있으므로, 헬릭스각이 0°일 때의 유효직경은 Fig.4에서 나타난 각 방향에 대하여 얻은 유효직경의 평균값으로부터 계산하도록 한다. 이미 얻어진, 공구에 대한 단면2차 모멘트로부터 식(7)을 이용하여 유효직경을 계산할 수 있다.

$$(D_{eq})_0 = \sqrt[4]{64 \frac{I_{yy}}{\pi}} \quad (7)$$

식 (7)을 이용하여 Table 1의 공구에 대하여 유효직경을 계산한 결과는 Table 2와 같다. 날부의 유효직경은 내접원의 비나, 날의 개수와 일정한 관계를 가지고 있다고 생각되나, 그 범위가 좁기 때문에 이 결과만으로는 뚜렷한 선형적 경향을 발견할 수는 없었다.

Table 2. Equivalent Diameter for 0° Helix Angle End Mill by Cross Section Analysis and Another Geometry Parameters of End Mill

No.	1	2	3	4	5
Inscribed Dia., D_m (mm)	5.12	4.97	6.44	6.24	7.44
Ratio (D_m/D)	0.64	0.62	0.64	0.62	0.62
Equivalent Dia., $(D_m)_0$ (mm)	5.95	6.22	7.83	7.99	9.46
Ratio ($(D_m)_0/D$)	0.74	0.78	0.78	0.80	0.79

실험으로부터 얻은 엔드밀의 처짐량으로부터 날부의 유효직경을 선정하는데 필요한 식을 다음과 같이 유도한다. 계산의 편의를 위하여 Fig.5의 모델에서 엔드밀을 생크부와 날부의 두 개의 구간으로 단순화하여 생각한다. i 를 2로 놓으면 식 (4)에서 측정점 $x=x_i=x_2$ 이고, 날부의 처짐량 y_2 는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (8)에서 I_{yy} 는 날부의 단면 2차 모멘트이다.

$$y_2 = \frac{FA}{6EI_{yy}} \quad (8)$$

이 때, $A = 3(cf_x - x_1)(x_2 - x_1)^2 - (x_2 - cf_x)^3$

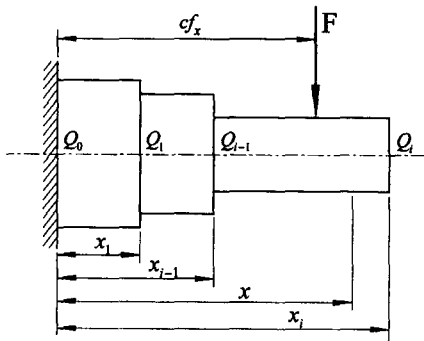


Fig. 5 Model of End Mill Deflection

식 (6)으로부터 $i=2$ 로 놓고 정리하면, 엔드밀의 전체 처짐량은 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_2 = y_1 + L_2 \Phi_1 + y_2 \quad (9)$$

y_1 과 Φ_1 은 생크부의 직경 D_1 과 길이 L_1 , 날부의 길이 L_2 로부터 계산할 수 있는 값이고, 공구 끝단에서의 처짐량 Y_2 는 실험이나, 유한요소해석에서 얻는 결과값이다. 따라서 알고 있는 값을 우변으로 보내면, 날부만의 처짐량 y_2 에 대하여 다음과 같은 식을 얻는다.

$$y_2 = Y_2 - y_1 - L_2 \Phi_1 \quad (10)$$

식 (10)과 식 (8)을 연립하여 유효직경 D_{eq} 에 대하여 풀면, 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$D_{eq} = 2.4 \sqrt[4]{\frac{2F}{3\pi E(Y_2 - y_1 - L_2 \Phi_1)} A} \quad (11)$$

본 연구에서는 헬릭스각이 공구의 강성에 미치는 영향을 해석하기 위하여 상용유한요소해석 프로그램인 Patran을 사용하였다. Fig.6은 Table 1에 나타난 단면 형상을 갖는 엔드밀에 대한 유한요소해석을 위하여 생성된 3차원 모델의 예이다. 유한 요소 해석 결과로부터 얻은 처짐량 Y_2 로부터 식 (11)을 이용하여 헬릭스각의 변화에 따른 유효직경값을 계산한다. 날부의 단면 2차 모멘트의 평균값을 이용하여 헬릭스각이 0°일 때의 유효직경, $(D_{eq})_0$ 를 식(7)로부터 계산하고, FEM해석을 통하여 얻은 처짐량의 결과로부터 헬릭스 각이 15°, 30°, 45°, 60°일 때의 유효직경 (D_{eq}) 를 식(11)로부터 계산하여 이

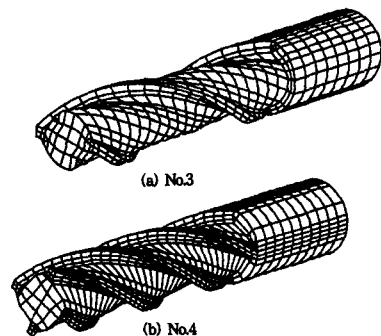


Fig. 6 FEM Mesh Generation

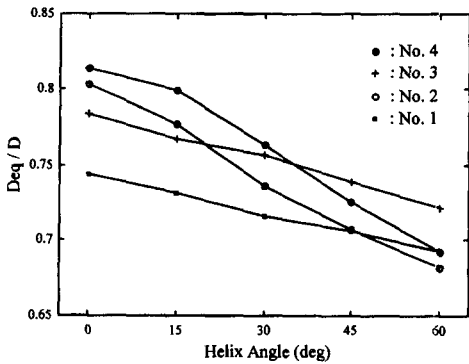


Fig. 7 Variation of Equivalent Diameter according to the change of Helix Angle

를 헬릭스각의 변화에 따라 Fig. 7로 나타내었다. Fig. 7로부터 단면 2차모멘트의 평균값으로부터 얻은 유효직경과 헬릭스각이 존재할 때의 유효직경이 헬릭스각이 증가함에 따라 선형적으로 감소함을 알 수 있다.

4. 신경망을 이용한 유효직경의 선정

엔드밀 단면의 복잡한 형상으로 인하여 헬릭스각에 따른 강성의 감소가 어떤 매개변수의 영향을 받는지 뚜렷하게 나타나지는 않지만, 날의 개수(n)와 내접원의 비(r)와 일정한 관계를 갖는 것으로 보인다. Fig. 7에서 No. 4를 제외하면 헬릭스각에 따른 유효직경의 감소가 매우 선형적이고, No. 4에 대해서도 선형적이라고 가정하더라도 큰 오차가 발생하지 않으므로, 임의의 헬릭스각에 대한 유효직경(D_{eq})을 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (12)에서 (D_{eq})₀는 헬릭스각이 0°일 때의 유효직경이고, f 는 날의 개수 n 과 내접원의 비 r 과 같은 공구 단면 형상에 의하여 결정되는 음의 계수이다.

$$D_{eq} = (D_{eq})_0 + f(n, r) \times H_\alpha \quad (12)$$

식(12)의 매개변수를 구하기 위해서는 다양한 형상의 엔드밀을 제작하고, 제작된 공구를 이용하여 처짐실험을 수행하여야 한다. 그러나 엔드밀의 제조공정상 다양한 내접원의 비를 갖는 엔드밀을 제작하는 데는 많은 어려움이 따르므로, 본 연구에서는 실제 엔드밀을 이용하여 처짐실험을 수행하지 않고 유한요소 해석을 이용하여 처짐 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, 범용 엔드밀의 공구단면은 칩의 배출성능과 제작상의 제한조건과 같은 다양한 설계

조건을 만족시켜야 하므로, 날의 개수와 내접원의 비가 결정되면 적절한 공구의 단면을 예측하는 것이 가능하다. 따라서, 강성 감소 기울기의 결정을 위하여, 고성림에 의하여 제작된 엔드밀 설계 전용 프로그램⁽¹¹⁾을 이용하여 다양한 공구형상을 얻었다. 이 때, 해석의 편의를 위하여 내접원의 비가 70%인 공구에 대해서 날의 개수를 변화시켰다. Table 3에서 4날과 6날짜리에 대하여 각각 90%와 60%의 내접원의 비를 갖는 공구형상을 해석하지 않은 것은, 그와 같은 내접원의 비가 4날과 6날짜리 엔드밀에 대하여 적용이 불가능하기 때문이다.

Table 3. Variation of the Rigidity Coefficient according to the variation of the Ratio of Incribed Circle Diameter and the Number of Tooth

r \ n	2	3	4	6
60%			-0.0276	
70%	-0.0014	-0.0165	-0.0191	-0.0215
80%			-0.0084	-0.0116
90%				-0.0076

언어진 공구단면을 이용하여 헬릭스 각에 따른 강성 감소 기울기 $f(n, r)$ 에 대한 관계식을 수립하기 위하여, 날의 개수와 내접원의 비($r = D_{ins} / D$)가 서로 다른 공구 단면에 대하여 헬릭스각을 15°, 30°, 45°, 60°로 변화시키면서 엔드밀을 3차원으로 모델링하여 유한 요소 해석을 수행하였다. 유한 요소 해석을 통하여 얻어진 처짐량과 식 (11)을 이용하여 엔드밀의 강성 감소 계수 f 를 계산하였다. 최소자승법을 이용하여 얻어진 기울기를 날의 개수와 내접원의 비에 따라 Table 3과 같이 나타낼 수 있다.

Table 3의 결과를 보면, 날의 개수(n)가 증가하면, 강성 감소 기울기(f)가 음의 방향으로 증가하는 경향을 갖는다. 이는 여러개의 날을 갖는 공구일수록, 헬릭스각에 따라 공구의 강성이 급격히 감소함을 의미한다. 또, 내접원의 비(r)가 증가하면, 강성 감소 기울기(f)는 감소하는 경향을 갖는 것을 알 수 있다. 그러나 표 3에 나타낸 날의 개수와 내접원의 비는 유효직경(D_{eq})의 경향을 어느 정도 설명해주는 것이지만, 임의의 공구에 대한 유효직경을 예측하는데 충분치 않다. 그 이유는 날의 개수와 내접원의 비가 같더라도 공구의 단면형상이 조금씩 변화할 수 있고, 이러한 변화가 유효직경에 영향을 미치기 때문이다. 이와 같은 공구의 강성 감소 기울기가 갖는 비선형성으로 인하여, 유효직경을 예측하기 위한 모델로서 신경망 이론을 사용하는 것이 매우 적절하다고 생각된다. 또한 신경망 이론

이 갖는 패턴 인식 능력에 의하여, Table 3의 계수들과 같은 정량적인 수치로는 표현할 수 없는 공구형상의 부분적인 변화를 충분히 고려할 수 있을 것으로 생각된다.

공구의 유효직경 (D_{eq}) 을 예측하기 위하여, Rumelhart 등에 의하여 제시된 일반화된 역전파 알고리즘이 사용되었다⁽¹²⁾. 실제 사용된 신경망의 구조는 Fig.8과 같이 나타낼 수 있다. Fig.8에 나타낸 것과 같이 신경망을 학습시키기 위한 입력패턴으로는 내접원의 비($r=D_{ins} / D$)와 공구의 단면2차모멘트로부터 식(7)을 사용하여 구한 헬릭스각이 0° 일 때의 공구유효직경의 비($(D_{eq})_0 / D$), 날의 개수(n)와 헬릭스 각을 사용하였다. 학습의 목표인 출력 패턴으로는 유한요소해석을 통하여 계산된 헬릭스각에 따른 유효직경(D_{eq})을 사용하였다. 학습을 위한 전달함수로는 식(13)과 같은 시그모이드 함수를 사용하였다.

$$O_{pj} = \frac{1}{1 + \exp\left\{-\left(\sum_i W_{ji} O_{ji} + \theta_j\right)\right\}} \quad (13)$$

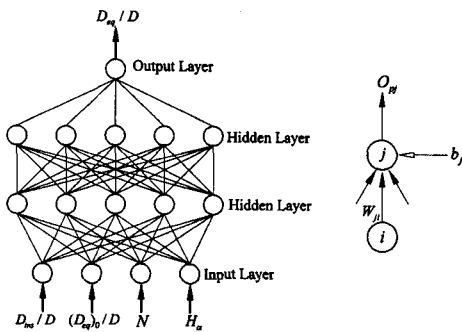


Fig. 8 Structure of Neural Network to determine Equivalent Tool Diameter

식(13)에서 O_{pj} 는 출력값이고, W_{ji} 는 각 노드 사이의 가중치, θ_j 는 문턱값이다. 효율적인 학습을 위하여, 가중치와 문턱값은 0부터 1사이의 난수로 초기화하였다. 신경망의 학습이 진행됨에 따라, 가중치와 문턱값은 오차를 감소시키는 적절한 학습속도와 학습률을 얻을 수 있는 구조를 찾기 위하여, 은닉층의 개수를 2개까지 증가시키고, 은닉층의 노드수는 20개로 설정하였다. 신경망의 노드수와 은닉층의 수에 따른 오차의 감소형태에 대한 예를 Fig.9에 나타내었다. Fig.9에서 은닉층의 수가 두개일 때 오차가 더 작아지는 것을 확인할 수 있다. 또 각 은닉

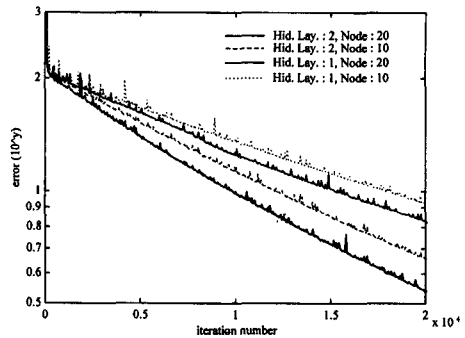


Fig. 9 Errors in Back Propagation Algorithm according to the change of Node Number in Hidden Layer

층의 노드수가 증가했을 때 오차가 더 작은 값으로 수렴되는 것을 알 수 있다. 여러 형태의 신경망에 대하여 학습을 수행시킨 결과, 은닉층의 수가 2개이고 노드 수가 20개일 때 오차가 최소로 수렴하였고, 이를 유효직경의 예측을 위한 모델로 사용한다. 231093번의 반복학습을 수행한 결과, 오차 제곱의 합이 0.001 이내로 수렴하였다.

신경망 모델을 이용하여 예측한 유효직경 값과, 학습 패턴으로 사용된 유한 요소 해석을 통하여 얻은 유효직경 값과의 비교를 Table 4에 나타내었다. 학습을 위하여 사용한 학습 패턴으로는 학습범위를 최대화하기 위하여 Table 3에 나타낸 유한요소해석 결과 45개에 Fig.7에 나타낸 내접원의 비가 0.64인 두날짜리 엔드밀에 대한 유효직경 예측 결과를 이용하여 공구의 직경에 관계없이 내접원의 비와 헬릭스각에 따라 최소자승법으로 구한 5개의 학습패턴을 포함시켰다. 이렇게 입력된 50개의 학습 패턴 중에서 20개의 패턴을 무작위로 선정하여 Table 4에 나타내었다. 내접원의 비가 0.62인 4날짜리 엔드밀은 시뮬레이션한 범위 내에 있으므로 학습을 위한 패턴으로 입력하지 않는다. 내접원의 비가 0.6에서 0.9까지의 범위 사이에서 변화할 때, 헬릭스각이 0° 일 때의 유효직경은 0.74에서 0.96 사이의 값을 갖는다. 오차가 매우 적은 것은 학습을 위하여 사용한 입력패턴을 그대로 이용하여 유효직경을 예측하였기 때문이다.

Table 4를 살펴보면 내접원의 비가 클수록 헬릭스각이 증가하더라도 강성이 별로 저하되지 않는 것을 알 수 있다. 반대로 내접원의 비가 작을 경우에는 헬릭스각의 증가에 따라 유효직경이 큰 폭으로 감소하는 것을 알 수 있다. 날의 개수가 많을수록 내접원밖에 존재하는 공구 단면이 증가하므로 헬릭스각에 따른 공구강성 감소폭이 크

Table. 4 Comparison of Equivalent Diameter between Given Values and Predicted Values by Neural Network

No.	Input Pattern			Output pattern			
	No. of Tooth	Ratio of Ins. Dia. ($r = D_m/D$)	Ratio of Equi. Dia. ($(D_m)/D$)	Helix Angle (deg)	Given Equiv. Dia. Ratio (D_m/D)	Predicted Equiv. Dia. Ratio (D_m/D)	Error. (%)
2	2	0.64	0.7634	15	0.7455	0.7493	-0.0324
3	2	0.64	0.7634	30	0.7356	0.7362	0.0763
4	2	0.64	0.7634	45	0.7217	0.7226	0.1190
5	2	0.64	0.7634	60	0.7078	0.7066	0.1075
7	2	0.7	0.7940	15	0.7926	0.7930	0.0459
12	3	0.7	0.8690	15	0.8525	0.8516	-0.1057
18	4	0.6	0.8274	30	0.7721	0.7729	0.1000
19	4	0.6	0.8274	45	0.7444	0.7437	-0.0923
20	4	0.6	0.8274	60	0.7168	0.7167	-0.0196
21	4	0.7	0.8627	0	0.8627	0.8645	0.2063
24	4	0.7	0.8627	45	0.8138	0.8103	-0.4345
27	4	0.7	0.8707	15	0.8520	0.8535	0.1812
30	4	0.7	0.8707	60	0.7960	0.7976	0.2053
33	4	0.8	0.8979	30	0.8811	0.8806	-0.0547
34	4	0.8	0.8979	45	0.8727	0.8733	0.0657
38	6	0.7	0.8661	30	0.8231	0.8230	-0.0113
39	6	0.7	0.8661	45	0.8015	0.8014	-0.0118
43	6	0.8	0.9073	30	0.8841	0.8844	0.0287
47	6	0.9	0.9537	15	0.9499	0.9502	0.0368
50	6	0.9	0.9537	60	0.9385	0.9368	-0.1801

다. 2날의 경우에는 내접원 바깥에 존재하는 공구의 단면적이 상대적으로 작기 때문에 3날이나 4날보다 강성의 감소폭이 다소 작다.

학습에 사용되지 않은 실제 엔드밀의 형상정보에 대하여 본 신경망 모델이 적절한 유효직경을 예측할 수 있는지 확인하기 위하여 Table 1에 나타난 엔드밀의 형상정보를 신경망에 입력하여 유효직경을 예측하였다. 그 결과를 Fig.10에 나타내었다. 1번과 3번 엔드밀은 학습패턴으로 사용한 값과 거의 유사하기 때문에 예측값의 오차가 매우 작다. 유한요소해석을 통하여 얻은 유효직경 5.723mm와 7.559mm에 대하여 신경망 예측 결과는 5.8544mm와 7.592mm로서 오차가 1번에서는 2.3%이고 3번에서는 0.44%인 것을 알 수 있다. 반대로 2번

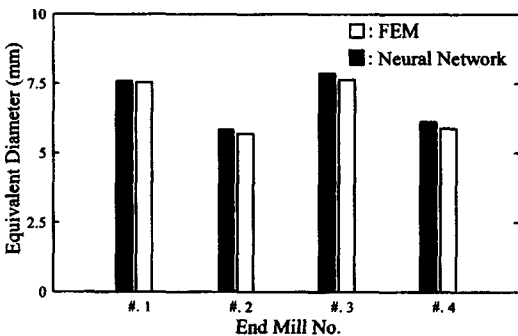


Fig. 10 Simulated Result of Tool Diameter by using the Neural Network

과 4번 엔드밀은 학습패턴으로 사용한 값과 내접원의 비와 유효직경의 비가 크게 다르다. 2번과 4번의 경우에서도 유한요소 해석을 통하여 얻은 유효직경 5.8864mm와 7.6272mm에 대하여 신경망 예측 결과는 6.1096mm과 7.865mm로서 각각 3.79%와 3.12%의 오차를 갖는다.

전체적으로 2날의 경우에는 학습패턴과 상당히 유사하기 때문에 오차가 작은 것을 알 수 있고, 4날의 경우에는 학습패턴과 약간의 차이가 존재하기 때문에 오차가 상대적으로 조금 큰 경향을 갖는다. 그러나 예측값에서 볼 수 있는 오차는 입력패턴의 비선형성을 감안하면 상당히 정확한 것으로 평가할 수 있다. 4날에서 더 큰 오차가 발생하는 이유는 엔드밀의 내접원이 고정되더라도 flute부의 형상에 따라서 공구 강성이 약간 변화할 수 있기 때문에, 실험에 사용한 엔드밀의 형상이 신경망 학습에 사용한 엔드밀과 약간의 차이가 있기 때문이다. 결과에서 알 수 있듯이 그 영향이 어느 정도 존재하는 것으로 생각되므로 추후의 연구를 통하여 엔드밀의 제작과정에서 발생하는 그밖의 형상결정인자에 대하여 추가로 고려할 필요가 있다고 생각된다.

대부분의 범용 엔드밀은 Table 3에 나타난 범위 내의 형상을 가지지만, 만일 형상의 차이가 크다면 신경망의 결과값에 대하여 신뢰성을 보장할 수 없으므로, 필요하다면 학습 범위를 증가시켜 다시 신경망을 학습시켜야만 적절한 예측값을 얻을 수 있다.

5. 엔드밀의 처짐 실험

처짐 모델의 검증을 위하여 Table 1의 공구를 Fig.11과 같은 조건으로 설치하고, 5kgf의 정하중을 가한 상태에서 처짐량을 측정하는 실험을 수행하였다. 엔드밀의 변

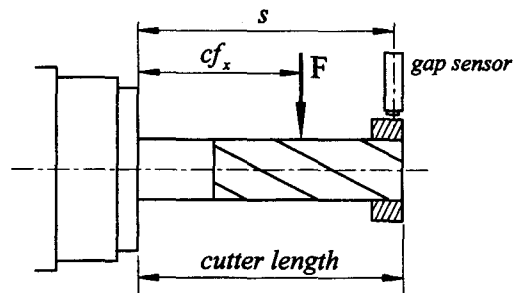


Fig. 11 Experimental Setup

의를 측정하기 위해서 Capacitac사의 HPT-75 type의 비접촉 와전류형의 캡센서를 사용하였고, amplifier로는 Capacitac사의 4100-SL Board를 사용하였다. 하중을 정확히 측정하기 위하여 Kistler사의 공구동력계 9257B를 사용하였으며, 10마력 머시닝 센터의 스펀들에서 치짐실험을 수행하였다. Fig.11에서 센서의 위치s는 공구의 직경이 8mm일 때 46mm, 10mm일 때 59mm로 고정시킨 상태에서 치짐실험을 진행하였다. 하중의 작용점, cf_x 는 공구의 직경이 8mm일 때 36.5mm, 10mm일 때 48mm로 고정하였다. 날부길이와 생크부의 길이에 따라 치짐량이 변화하게 되는데, 전체 공구 길이가 8mm일 때는 50mm, 10mm일 때 63mm로 하여 spring collet을 이용하여 고정하였다.

5kgf의 정하중을 공구의 끝단에 가했을 때 홀더의 끝단에서의 치짐량은 1~2 μ m 이하로 측정되었으며, 엔드밀의 치짐에 비하여 매우 작은 양이므로 그 영향을 무시하도록 한다.

Fig.12는 각각의 엔드밀에 대하여 실험을 통하여 치짐량을 측정된 결과와 신경망 모델을 이용하여 공구 날부의 유효직경을 예측하고 이 값을 이용하여 실험과 동일한 위치에 정하중이 작용할 때의 치짐량을 예측한 값을 서로 비교한 그림이다. 예측된 치짐량은 2날의 경우에는 실험에 의한 치짐값과 매우 비슷한 것을 알 수 있다. 1번 엔드밀에서는 실험값이 50.4 μ m일 때 이론적인 계산값은 43.6 μ m로서 오차는 -13%이다. 그밖에 2,3,4번에 대하여 각각 실험값은 41 μ m, 55 μ m, 59 μ m이고, 이론값은 37.7 μ m, 42.5 μ m, 38.7 μ m로서 오차는 각각 -8.05%, -22.7%, 54.4%이다.

실험결과에서 직경이 8mm일 때의 오차는 날의 개수에 관계없이 10% 내외인데 반하여, 직경이 10mm인 경우에는 이론값과 30% 가량의 오차가 발생하는 것을 알 수

있다. 이러한 오차의 원인으로는 세가지 요인을 크게 들 수 있다. 가장 큰 영향을 미친다고 생각되는 요소는 날부와 생크부 사이에 존재하는 과도구간의 변화이다. 공구의 직경이 클수록 제작공정에서 사용되는 연마휠이 크기 때문에, 결과적으로 과도구간이 길어지게 되어 공구의 강성이 떨어진다. 현재의 모델은 이와 같은 과도구간의 영향을 무시하기 때문에 실제 공구의 치짐량이 더 큰 값을 갖는 것으로 생각된다. 직경 8mm인 엔드밀의 경우에는 생크부가 10mm이기 때문에 상대적으로 과도구간이 좁고 그 형태가 매우 다르다.

두번째로, 신경망을 이용한 유효직경 선정 과정에서 발생한 오차가 모든 경우에 대하여 실제보다 약간 큰 유효직경을 계산하였는데, 이는 계산에 의한 치짐량을 일정 정도 감소시킨 것으로 생각된다.

세 번째로, 스펀들에서 발생한 치짐의 양이 매우 작기는 하지만, 실험값의 치짐량을 약간 증대시켜 전체적으로 오차를 크게 만든 요인이라고 생각된다.

6. 결 론

1. 공구의 단면 형상으로부터 임의의 방향에 대한 단면 2차 모멘트를 계산할 수 있는 알고리즘을 개발하였다.
2. 유한요소해석을 통하여 헬릭스각의 변화에 따른 공구강성의 감소 경향을 분석하였다.
3. 다양한 형태의 공구에 대하여 유한요소해석을 이용하여 헬릭스각에 따른 유효직경의 변화를 해석하고, 신경망 이론을 이용하여 날의 개수와 내접원의 비에 따라 유효직경을 예측할 수 있는 모델을 수립하고 실제 공구를 이용하여 그 타당성을 검증하였다.
4. 엔드밀의 날부길이, 생크부의 길이, 신경망을 이용하여 구한 유효직경 등의 다양한 형상 매개 변수를 이용하여 치짐량을 예측하고, 엔드밀에 대한 치짐실험을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 우수연구센터인 부산대학교의 정밀정형 및 금형가공연구센터 (지원과제번호 94-K3-0909-03-01-3)에 의해서 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

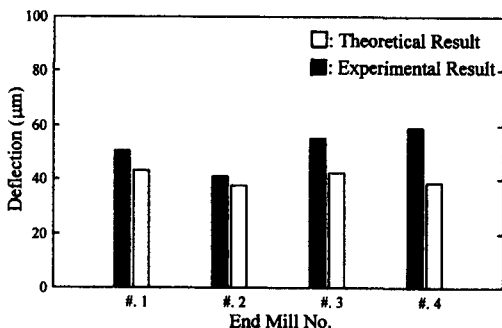


Fig. 12 Comparison of Experimental and Simulated Deflections of End Mill

참고 문헌

1. W. A. Kline, R. E. Devor, J. R. Shareef, "The Prediction of Surface Accuracy in End Milling", Trans. of J. of Eng. for Ind., Vol. 104, pp. 272~278, 1982.
2. J. Tlusty, M. Elbestawi, "Constraints in Adaptive Control with Flexible End Mills, Annals of CIRP, Vol. 28, , No. 1, pp. 253~255, 1979.
3. S. Takata, M. D. Tsai, M. Inui, T. Sata, "A Cutting Simulation System for Machinability Evaluation Using a Workpiece Model", Annals of CIRP, Vol. 38, No. 1, pp. 417~420, 1989.
4. W. A. Kline, R. E. Devor, J. R. Lindberg, "The Prediction of Cutting Forces in End Milling with Application to Cornering Cuts", Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol 22, pp. 7~22, 1982.
5. 이상규, 고성림, "엔드밀 가공시 공구 변형을 고려한 표면 형성 해석", 한국정밀공학회 '96년도 춘계 학술대회 논문집, pp. 119~124, 1996.
6. J. W. Sutherland, R. E. Devor, "An Improved Method for Cutting Force and Surface Error Prediction in Flexible End Milling Systems", ASME J. of Eng. for Ind., Vol. 108, Nov., pp. 269~279, 1986.
7. C. J. Oxford Jr., "A Review of Some Recent Development in the Design and Application of Twist Drills", Proc. 8th Int. M.T.D.R. Conf., p855, 1967.
8. J. Tlusty, P. Macneil, "Dynamics of Cutting Forces in End Milling", Annals of CIRP, Vol. 24, No. 1, pp. 21~25, 1975.
9. L. Kops, D. T. Vo, "Determination of the Equivalent Diameter of an End Mill Based on its Compliance", Annals of CIRP, Vol. 39, No. 1, pp. 93~96, 1990.
10. Yoshiya Fujii, Hiroyasu Iwabe, "Cross Sections and Flexural Rigidity of Helical End Mills", JSPE, Vol.49, No. 6, pp. 45~50, 1983.
11. 고성림, "엔드밀 제작용 연삭숫돌형상과 가공조건 결정을 위한 프로그램 개발", 한국정밀공학회지, Vol.13, No. 8, pp. 164~174, 1996.
12. D. E. Rummelhart, J. L. McClelland, and the PDP Research Group, "Parallel Distributed Processing, Vol.1:Foundations", The MIT Press, Massachusetts, 1986.