

공구날 특이길이의 물리적 적합성 고찰

Physically Compatible Characteristic Length of Cutting Edge Geometry

안일혁¹, 김익현², 황지홍^{3,✉}

Il-Hyuk Ahn¹, Ik-Hyun Kim² and Jihong Hwang^{3,✉}

¹ LG 전자 생산기술원 (Productivity Research Institute, LG Electronics Inc.)

² 서울과학기술대학교, NID 융합기술대학원 (Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul Nat'l Univ. of Sci. & Tech.)

³ 서울과학기술대학교, 제품설계금형공학과 (Dept. of Product Design & Manufacturing Eng., Seoul Nat'l Univ. of Sci. & Tech.)

✉ Corresponding author: hwangjh@seoultech.ac.kr, Tel: 02-970-6396

Manuscript received: 2011.8.16 / Revised: 2011.10.4 / Accepted: 2011.11.6

The material removal mechanism in machining is significantly affected by the cutting edge geometry. Its effect becomes even more substantial when the depth of cut is relatively small as compared to the characteristic length which represents the shape and size of the cutting edge. Conventionally, radius or focal length has been employed as the characteristic length with the assumption that the shape of cutting edge is round or parabolic. However, in reality, there could be various ways to determine the radius or focal length even for the same tool edge profile, depending on the region to be considered as cutting edge in the measured profile and the constraints to be set in constructing the best fitted circle or parabola. In this regard, the present study proposes various models to determine the characteristic length in terms of radius or focal length. Their physical compatibility are validated by carrying out 2D orthogonal cutting experiments using inserts with a wide range of characteristic length (30 – 180 μm in terms of radius) and then by investigating the correlation between the characteristic length and the cutting forces. Such validation is based on the common belief that the larger the characteristic length is, the blunter the cutting edge is and the higher the cutting forces are. Interestingly, the results showed that the correlation is higher for the radius or focal length obtained with a constraint that the center of best fitted circle or the focus of the best fitted parabola should be on the bisecting line of the wedge angle of tool.

Key Words: Cutting Edge Geometry (공구날 기하), Characteristic Length (특이길이), Physical Compatibility (물리적 적합성)

1. 서론

최근 절삭 연구에 있어 공구날 형상은 가공 시 발생하는 물리적인 현상들을 지배하는 중요한 인자로 인식되고 있다.¹ 이는 동일한 절삭 조건 하에서도 공구날 형상에 따라 변형 형태, 응력 및 온도 분포, 칩의 형상 그리고 가공 면의 품위 등이 달라질 수 있기 때문이다.^{2,4} 이러한 현상은 특히

절삭깊이가 공구날 형상의 크기에 비해 상대적으로 작을 때 (예: 마이크로 머시닝) 두드러지는데, 이 경우 공구날 형상에 대한 정보는 가공 시 발생하는 물리적인 현상들을 이해하는데 반드시 필요하다.

지금까지 절삭과 관련된 연구에서 공구날 형상을 대표하기 위해 가장 흔하게 사용된 인자는 공구날 반경이라고 할 수 있다. 이는 공구날 형상이 기본적으로 원에 가깝다는 점이 받아들여진 결과

라고 할 수 있다. 하지만 실제의 공구날 형상은 제조상의 어려움 또는 제작사의 의도에 따른 결과로 완전한 원의 형상을 가지고 있지 않은 경우가 많으며 공구날 형상이 서로 같지 않으면서도 동일한 값의 공구날 반경을 갖는 경우가 존재한다. 이 경우 가공 시 발생하는 물리적인 현상이 서로 동일해야만 공구날 반경이 해당 형상들을 대표할 수 있는 적절한 인자라고 할 수 있다. 하지만 실제에 있어 공구날 반경이 이러한 조건을 만족하는지는 아직 검증된 바가 없다. 즉, 물리적인 의미에서 공구날 반경이 공구날 형상을 대표하기에 적절한지 아직 검증된 바가 없다.

한편, 공구날 형상과 관련된 일부 연구에서는 공구날이 원보다는 포물선에 의해 대표되는 게 바람직하다는 주장 역시 제기되었다. 이를 뒷받침하기 위해 Childs 등⁵은 white light interferometer를 이용하여 공구날을 측정하고 공구날 형상이 단순한 원의 형상이 아님을 보고하였다. 또한 Asai 등⁶은 공구날 형상을 가장 잘 표현할 수 있는 형상으로 원과 포물선을 비교하였는데, 공구날 형상이 날카로워질수록 포물선이 더 좋은 기하학적 일치를 보여 준다고 주장하였다. 하지만 이 역시, 동일한 포물선(초점 거리)에 의해 대표되는 공구날 형상들이 실제에 있어 물리적으로 동일한 양상을 보여주는지에 대해서는 보고된 바가 없다. 즉, 앞에 언급된 원의 반경이나 포물선의 초점 거리는 공구날 형상에 대한 기하학적 대표성을 지닌다고는 할 수 있으나 절삭 가공에 대한 물리적인 대표성을 지닌다고는 할 수 없다. 이는 절삭 연구에서 공구날 형상의 중요성이 강조되는 이유가 공구날 형상 자체가 아니라 공구날 형상에 따라 달라지는 물리적 현상들이라는 점에서 문제가 될 수 있다.

따라서 본 논문에서는 물리적 적합성 측면에서 공구날 형상을 가장 잘 대표할 수 있는 값을 찾는 것을 목표로 한다. 여기서 물리적 적합성이란 공구날 형상이 서로 다르다 할지라도 이들을 대표하는 값이 동일하다면 절삭 시 발생하는 물리적 현상이 동일해야 함을 의미한다. 본 논문에서는 이를 위해 먼저 원과 포물선을 기본으로 하여 공구날 형상을 나타낼 수 있는 다양한 모델들을 제시한다. 그 다음에는 완전한 원이나 포물선의 형태를 갖지 않는 다양한 실제의 공구날들에 대해 각 모델에 따른 대푯값들을 구한다. 그리고는 해당 공구날들을 이용하여 2 차원 절삭 실험을 수행하고 각 모델에 따른 대푯값들과 절삭력과 상관관

계를 살펴봄으로써 각 모델들의 물리적 적합성에 대한 검증을 시도한다. 여기서 물리적 적합성에 대한 검증을 위해 절삭력과 상관관계를 살펴보는 이유는 일반적으로 절삭력이 절삭 시 발생하는 물리적 현상을 가장 잘 반영하는 것으로 받아들여지기 때문이다. 즉, 공구날 형상이 서로 다르다 할지라도 이들을 대표하는 값이 같다면 공구날의 절삭력 편차가 적을수록 공구날을 대표하는 값의 물리적 적합성은 높다고 할 수 있다. 마지막으로 제시된 모델 중에서 가장 높은 상관관계를 갖는 모델들이 선정되고 해당 모델들이 보다 높은 물리적 적합성을 가지는 이유가 무엇인지에 대한 논의가 덧붙여진다.

2. 공구날 특이길이의 표현

기존 연구에서 공구날 형상을 대표하기 위해 가장 일반적으로 사용된 기하 형태는 원과 포물선이다.^{6,7} 따라서 본 논문에서는 원과 포물선을 기본 형태로 하여 공구날 형상을 나타낼 수 있는 5 가지 모델을 제시하였다. 제시된 모델들은 형태적 요소인 원과 포물선, 대칭적 요소인 대칭축의 위치, 절삭 조건적 요소인 공구경사각 등을 고려하여 정의되었다. 공구날 형상을 대표할 수 있는 값으로는 원의 경우는 반경, 포물선의 경우는 초점 거리가 사용되었다. 이러한 길이들은 명칭의 통일성을 위하여 이후 특이길이(Characteristic length, CL, μm)로 칭하기로 한다. 특이길이는 제시된 모델 각각에 대해 최소자승법을 이용하여 실제의 공구날 형상과 최적으로 부합하는(최소 누적 오차를 갖는) 원이나 포물선을 구함으로써 얻어진다.

2.1 제안된 모델

Fig. 1 은 공구날 특이길이를 구하기 위해 제시된 모델들에 대한 도식적인 설명을 보여 준다. 그림에서 모델 1-4 는 wedge angle 의 이등분 선이 지면의 밑변에 대해 수직이 되도록 나타낸 반면, 모델 5 는 실제 절삭 조건을 고려하여 나타내었다. 이는 공구날 형상에 최적으로 부합하는 원이나 포물선을 구하기 위해 분석 대상이 되는 유효 영역(effective range)을 선정할 때, 모델 1-4 는 실제 절삭 조건에 대한 정보를 필요로 하지 않지만, 모델 5 는 실제 절삭 조건에 대한 정보를 필요로 하기 때문이다. 각 모델에 대한 구체적인 설명 및 유효 영역에 대한 정의는 다음에 보다 자세히 기술된다.

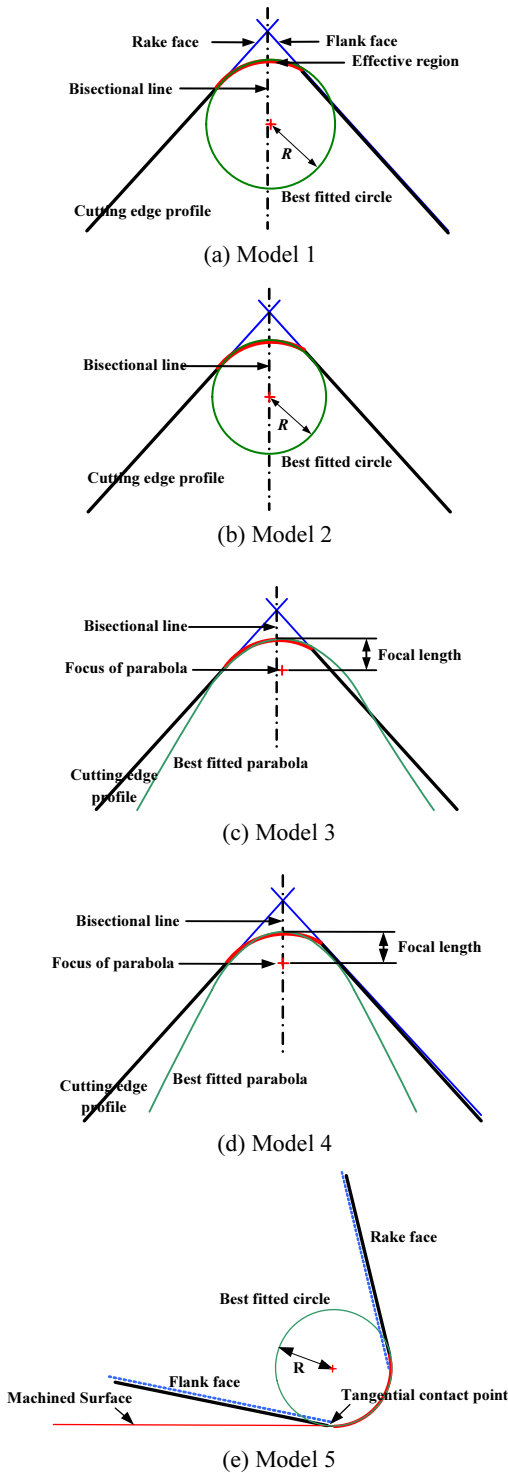


Fig. 1 Proposed models for representation of cutting edge geometry

2.1.1 모델 1

모델 1 은 유효 영역 내 공구날 형상과 가장 근접한 최적 원(best fitted circle)을 구하고 그 원의 반경을 공구날 형상의 특이길이로 사용하는 모델이다(Fig. 1(a) 참조). 모델 1에서는 최적 원의 반경을 구하기 위해 일반적인 원의 방정식(Eqn. (1))이 사용되었으며 최소자승법 이외에는 별도의 구속 조건이 주어지지 않았다. 유효 영역 내 공구날 형상의 좌표 점들(x_i, y_i)을 이용하여 Eqn. (1)의 인자들 (A, B, C)을 구하기 위해 Eqn. (1)을 행렬 형태 (matrix form)로 바꾸면 Eqn. (2)와 같이 표현할 수 있다. 이렇게 구해진 인자들과 최적 원의 중심 좌표(x_0, y_0) 및 반경(r) 사이의 관계는 Eqn. (3)과 같다.

$$x^2 + Ax + y^2 + By + C = 0 \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} x_1^2 & x_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_i^2 & x_i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$x_0 = -\frac{A}{2}, y_0 = -\frac{B}{2}, r = \sqrt{\frac{A^2 + B^2}{4} - C} \quad (3)$$

2.1.2 모델 2

모델 2 는 중심이 wedge angle 의 이등분선 (bisectional line) 상에 존재하는 원 중에서 유효 영역 내 공구날 형상과 가장 근접한 최적 원을 구하고 그 원의 반경을 공구날 형상의 특이길이로 사용하는 모델이다(Fig. 1(b) 참조). 이 모델은 Ranganath 등⁷ 이 공구날 형상의 특이길이를 측정하기 위해 사용한 모델이기도 하다. 이 모델을 적용하여 최적 원을 구하기 위해 사용한 원의 방정식은 Eqn. (4)와 같으며, 이 식의 행렬 형태인 Eqn. (5)와 유효 영역 내 공구날 형상의 좌표 점들(x_i, y_i)을 이용하여 인자들(B, C)을 구할 수 있다. Eqn. (4)에서 x_0 는 이등분 선의 x 축 좌표 값으로 이미 알고 있는 값이며, 인자들(B, C)과 최적 원의 y 축 중심 좌표(y_0) 및 반경(r) 사이의 관계는 Eqn. (6)과 같다.

$$(x - x_0)^2 + y^2 + By + C = 0 \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ y_i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(x_1 - x_0)^2 - y_1^2 \\ \vdots \\ -(x_i - x_0)^2 - y_i^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$y_0 = -\frac{B}{2}, R = \sqrt{\frac{B^2}{4} - C} \quad (6)$$

2.1.3 모델 3

모델 3 은 유효 영역 내 공구날 형상과 가장 근접한 최적의 포물선(best fitted parabola)을 구하고 포물선의 초점 거리를 공구날 형상의 특이길이로 사용하는 모델이다(Fig. 1(c) 참조). 공구날 형상이 칼 날(knife edge)과 같은 형상일 경우 원보다는 타원으로 그 형상을 표현하는 것이 더욱 정확하다는 주장이 있는데,⁶ 모델 3 은 그러한 결과를 반영한 결과라고 할 수 있다. 이 모델의 경우 최소자승법 이외에는 별도의 구속 조건이 존재하지 않기 때문에 일반적인 포물선 방정식을 그대로 사용하는 것이 가능한데, 그 식은 Eqn. (7)과 같다. 유효 영역 내 공구날 형상의 좌표 점들(x_i, y_i)을 이용하여 인자들(A, B, C)을 구하기 위해 Eqn. (7)을 행렬 형태로 변환하면 Eqn. (8)과 같으며, 이렇게 구해진 인자들과 초점 거리(focal length, f) 및 포물선의 꼭지점(vertex) 좌표(h, k) 사이의 관계는 Eqn. (9)와 같다.

$$y = Ax^2 + Bx + C \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_i & y_i & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -x_1^2 - y_1^2 \\ \vdots \\ -x_i^2 - y_i^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$f = \frac{1}{4A}, h = -\frac{B}{2A}, k = C - \frac{B^2}{4A} \quad (9)$$

2.1.4 모델 4

모델 4 는 모델 3 과 같이 포물선을 기본 형태로 갖는 모델로 포물선의 대칭 축이 wedge angle 의 이등분 선과 일치하는 모델이다(Fig. 1(d) 참조). 이 경우 포물선의 방정식은 Eqn. (10)와 같이 표현될 수 있으며 이는 다시 Eqn. (11)과 같은 행렬 형태로 변환될 수 있다. 이 식에서 x_0 는 이등분 선의 x 축 좌표 값으로 이미 알고 있는 값이며 Eqn. (10)의 인자들(A, B)과 초점 거리 및 포물선의 y 축 꼭지점 좌표(k) 사이의 관계는 Eqn. (12)와 같다.

$$Ay + B = (x - x_0)^2 \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ y_i & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (x_1 - x_0)^2 \\ \vdots \\ (x_i - x_0)^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$f = \frac{1}{4A}, k = -\frac{B}{A} \quad (12)$$

2.1.5 모델 5

모델 5 는 원을 기본 형태로 갖는 모델로 실제 절삭 조건을 반영한 모델이다. 즉, 최적 원을 구하는데 필요한 유효 영역의 선정 시 공구 여유면 상에서는 실제로 절삭에 참여하는 공구날 부위만을 유효 영역으로 간주하는 모델이다. 또한 최적 원이 공구날과 가공 면(machined surface) 사이의 접점(tangential contact point)에 접해야 한다는 구속 조건을 가지고 있다(Fig. 1(e) 참조). 이러한 구속 조건을 갖는 원의 방정식과 이를 행렬 형태로 변환한 식은 각각 Eqn. (13)과 Eqn. (14)와 같다. 이 식에서 (x_c, y_c)는 공구와 가공 면 사이 접점의 좌표를 나타내며 그 값은 절삭 조건이 주어지면 자동적으로 결정된다. 또한 최적 원 중심의 x 축 좌표 값(x_0)은 x_c 와 동일한 값을 가지므로 이 모델에서는 최적 원 중심의 y 축 좌표 값(y_0)이 최종적으로 구해져야 할 값이 된다.

$$\begin{aligned} (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 &= R^2 \\ x_0 &= x_c, R = y_0 - y_c \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} -2y_1 + 2y_c \\ \vdots \\ -2y_i + 2y_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y_0 \\ \vdots \\ y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_c^2 - y_1^2 - (x_1 - x_c)^2 \\ \vdots \\ y_c^2 - y_i^2 - (x_i - x_c)^2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

2.2 공구날 부위의 선정

공구날 형상을 나타낼 수 있는 특이길이를 구하기 위해서는 전체의 공구날 윤곽 곡선(cutting edge profile)에서 공구경사면(rake face)과 공구여유면(flank face)이 배제된, 단지 공구날 부위만이 포함된 유효 영역(effective region)을 선정할 필요가 있다. 이와 관련하여 Ogilvie 등⁸ 은 공구경사면과 공구여유면의 기울기 변화를 토대로 유효 영역을 선정한 바가 있다. 하지만 이 방법은 공구경사면과 공구여유면의 직선 영역과 공구날 부위의 곡선 영역을 잇는 중간(intermediate region) 영역까지도 곡선 영역으로 포함시킴으로써, 공구 끝 형상을

크게 평가하도록 되어 있어 공구날 형상의 물리적 적합성을 떨어뜨리는 경향이 있다.

이러한 문제를 피하기 위해 본 연구에서는 공구경사면의 직선 영역과 평행하면서 수직 거리가 1 μ m 떨어진 직선을 구하고, 그 직선과 가장 가까운 위치에 존재하는 점을 유효 영역의 시작점으로 선정하였다. 유효 영역의 끝점은 공구여유면을 상대로 공구경사면과 동일한 방법을 적용하여 구하였으며 유효 영역은 이렇게 구해진 두 측정치 사이의 점들로 구성되었다(Fig. 2(a)). 앞서 제안된 모델 1-4 의 경우, 이렇게 결정된 유효 영역이 공구의 특이길이 측정을 위해 사용되었다. 한편, 실제의 절삭 조건을 반영한 모델 5 의 경우에는 공구경사면에 대해서는 앞과 동일한 과정을 적용하여 시작점을 구하였으나, 공구여유면에 대해서는 공구날과 가공 면 사이의 접촉점을 끝점으로 하여 유효 영역을 선정하였다 (Fig. 2(b)). Fig. 2 는 앞서 설명한 유효 영역을 선택하는 두 가지 방법을 도식적으로 보여 준다.

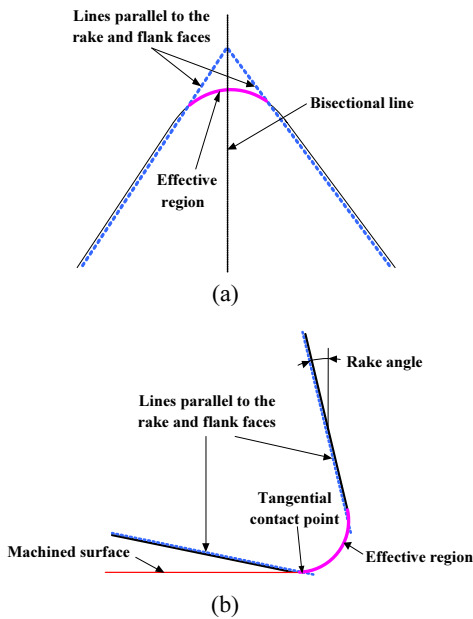


Fig. 2 Selection of effective tool edge region

3. 실험

공구날 형상을 나타내기 위해 제안된 모델들의 물리적 적합성을 비교하기 위해 실제 공구를 이용하여 2 차원 절삭 실험을 수행하였다. 보다 구체적인

으로는 완벽한 원이 아닌 다양한 수준의 비대칭성 및 특이길이를 갖는 30 개의 공구날을 제작하고 이들 공구날의 형상을 측정하여 앞서 제안된 모델들 각각에 대해 특이길이를 구하였다. 그 다음에는 이 공구들을 이용하여 절삭깊이와 공구경사각을 바꿔 가면서 2 차원 절삭 실험을 수행하고 절삭력을 측정하였다. 여기에서는 공구날 형상 측정 및 2 차원 절삭 실험에 대해 보다 자세히 설명하도록 한다.

3.1 공구날 형상의 측정

실험에는 ㈜한국야금에 의해 특별 제작된 코팅 처리되지 않은 30 개의 외경 선삭용 초경 인서트(코드 번호: TCGW16T304)가 사용되었다. 인서트는 삼각형의 형태를 취하며 7°의 여유각, 9.525 mm 의 내접원 직경, 0.4mm 의 nose 반경을 가지며 스크류에 의해 공구 홀더에 부착된다. 이 인서트들은 제작사 자체 측정 결과 30-180um 의 공구날 반경을 갖는 것으로 파악되었다. 한편, 본 연구는 공구날 형상이 완전한 형상을 가지지 않을 때 앞서 제안된 모델들이 물리적 측면에서 공구날 형상들을 얼마나 잘 대표할 수 있는지를 살펴보는 데 목적을 두고 있다. 따라서 실험에 사용된 인서트들은 공구날 형상에 있어 Fig. 3 과 같이 다양한 수준의 비대칭성을 가질 수 있도록 의도적으로 제작되었다. 공구와 피삭재 간의 절삭 공구날 형상의 측정을 위해서는 TELSTAR-HOMMEL 사의 T8000 윤곽 형상 측정기(contour profiler)가 사용되었다. 측정은 0.1mm/s 의 속도로 공구경사면에서 공구여유면 방향으로 이루어졌다. 측정 시 인서트는 공구날 단면의 최고 높이 영역이 측정기의 측정 범위 중간에

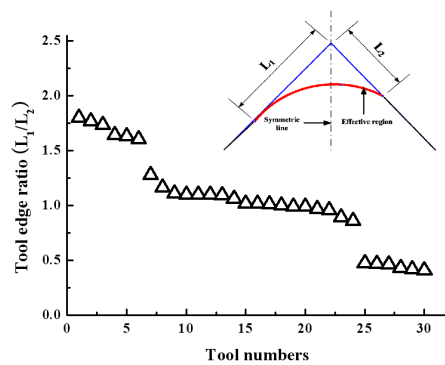


Fig. 3 Asymmetry of cutting edge geometry for the inserts

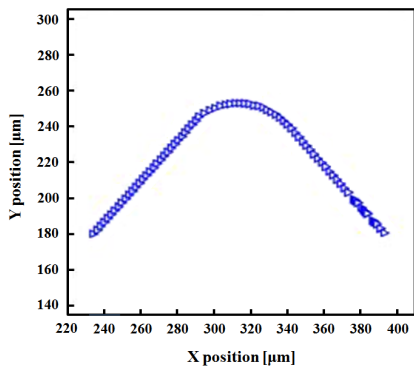


Fig. 4 An example of measured cutting edge profile

놓이도록 설치되었는데 이는 측정기의 초기 가속 구간을 피하고 안정적인 측정을 하기 위함이었다. Fig. 4 는 이렇게 측정된 공구날 형상의 예를 보여 주며 Table 1 은 측정된 30 개의 공구날 형상에 대해 앞서 제안된 5 개의 모델을 적용하여 구한 특이길이를 보여 준다.

3.2.2 차원 절삭 실험

2 차원 절삭은 재료의 변형 및 칩의 생성이 평면적으로 이루어지기 때문에 절삭 시 발생하는 현상들의 기초적 연구에 널리 이용되는 방법이다.⁹ 본 연구에서도 2 차원 절삭의 이러한 이점을 이용하기 위해 Fig. 5 와 같이 linear slider 와 마이크로 스테이지로 구성된 2 차원 절삭 실험 장치가 사용되었다. 그림에서 알 수 있듯이, 공구는 공구날이 피삭재의 운동 방향과 수직이 되도록 마이크로 스테이지 상에 고정되어 있다. 마이크로 스테이지는 1μm 의 분해능을 가진 디지털 마이크로미터에 의해 위치가 조정되므로 깊이는 마이크로미터의 눈금을 이용하여 정밀하게 설정할 수 있다. 마이크로

Table 1 Characteristic length (CL, μm) calculated for the proposed models

Insert No.	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5
1	56.33	41.70	23.89	15.48	39.99
2	50.60	35.22	21.83	13.55	33.28
3	45.70	44.39	20.16	19.21	39.97
4	58.09	57.26	24.19	23.32	60.22
5	65.65	65.89	28.38	28.50	75.10
6	69.48	70.01	30.33	30.43	78.08
7	83.79	89.71	36.85	39.16	91.96
8	79.53	78.48	34.54	33.83	84.31
9	88.64	88.29	38.25	37.99	99.86
10	88.53	89.37	39.69	39.99	98.58
11	94.40	101.44	42.17	45.56	105.40
12	131.78	132.28	57.65	57.87	148.61
13	51.42	51.15	22.37	22.02	51.91
14	70.22	68.82	30.73	29.76	89.14
15	99.44	94.84	40.21	37.15	109.13
16	73.59	73.78	31.56	31.48	78.25
17	69.08	70.60	26.14	26.13	58.59
18	84.04	63.15	31.96	23.44	46.10
19	50.25	39.06	22.08	15.60	38.93
20	85.28	77.42	38.23	33.51	71.03
21	58.85	55.05	25.56	23.06	60.88
22	69.13	41.55	28.06	15.59	33.96
23	41.94	40.81	16.77	14.71	30.17
24	50.32	55.80	20.42	22.03	38.04
25	108.84	65.84	38.22	23.30	139.40
26	128.09	77.53	48.55	29.05	160.11
27	115.81	66.22	41.45	23.95	165.65
28	85.97	57.10	32.29	20.99	104.63
29	102.18	68.22	36.82	24.27	142.03
30	76.15	44.99	27.72	16.26	79.77

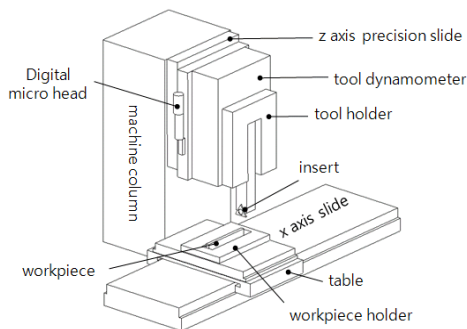


Fig. 5 Two dimensional (2D) orthogonal cutting arrangement

스테이지는 기계의 column 에 고정된 공구 동력계 (Kistler 9257) 상에 부착되며 절삭 시 발생하는 절삭력은 이 공구동력계를 통해 실시간으로 측정된다. 피삭재는 최대 1m/sec 의 속도로 운행이 가능한 linear slider 의 테이블 상에 부착된다.

2 차원 절삭 실험에는 재료 조성 편차에 따른 가공 편차를 줄이기 위해 99.95%의 높은 순도를 가지는 아연(zinc) 판재가 피삭재로 사용되었다. 피삭재는 100mm(길이) × 50mm(높이) × 2mm(폭) 의

크기를 가지며 제조사(Goodfellow)에 의해 제조된 상태(as rolled, Hv: 48.3) 그대로 사용되었다. 절삭깊이는 재료 물성치에 따른 치수효과를 줄이기 위해 비교적 큰 값인 50, 100, 150 μm 로 설정하였다. 공구경사각은 공구 인서트의 wedge angle (82.5°)을 고려하여 -10° , 0° , 5° 로 설정하였고, 동일한 공구 인서트에 대해 마이크로 스테이지 상의 공구홀더 (한국야금㈜ STFCR2020-K16) 설치 각도를 바꿔 줌으로써 공구경사각을 조절하였다. 절삭 속도(cutting velocity)는 열에 의한 영향을 최소화하면서 가공의 안정성을 기하기 위해 낮은 속도인 100 mm/sec 로 설정하였다. 절삭깊이는 2 차원 실험 장치의 특성상 100mm 로 제한하였다. 절삭은 통계적 분석을 위해 총 9 개의 실험 조건(3 가지 절삭깊이 \times 3 가지 공구경사각)에서 30 개의 인서트 각각에 대해 5 회 반복 수행되었는데 총 절삭깊이가 500mm 로 짧은 관계로 공구의 마모는 관측되지 않았다. Table 2 는 이상의 실험 조건을 요약한 것이다.

Table 2 Summary of cutting conditions

Conditions	Value
Cutting velocity(mm/sec)	100
Length of cut(mm)	100
Depth of cut(μm)	50, 100, 150
Rake angle(degree)	5, 0, -10

4. 결과 및 토론

공구날 형상의 특이길이를 계산하는 모델 중 물리적 적합성이 우수한 모델을 찾기 위해서는 각 모델들을 기초로 하여 계산된 공구날 특이길리와 2 차원 절삭 실험을 통해 얻어진 절삭력 사이의 상관관계를 구해야 한다. 이를 위해서는 먼저 둘 사이의 함수 관계를 알아야 하는데 공구날 특이길리와 절삭력 사이의 함수 관계는 명확하게 밝혀진 바가 없다. 따라서 본 연구에서는 먼저 다양한 함수 관계에 대해 회귀분석(regression analysis)¹⁰을 이용하여 특이길리와 절삭력 사이의 상관계수(correlation coefficient, R)를 구하고 그 중 모든 조건에 걸쳐 전체적으로 높은 상관계수를 주는 함수 관계를 특이길리와 절삭력 사이의 관계를 규정 짓는 함수로 결정하였다. 그 결과 직선함수가 선정되었는데, 절삭깊이가 100 μm 이고 공구경사각이 0° 일 때 모델 2 에 의해 구해진 특이길리와 절삭력 사이의 관계를 보여주는 Fig. 6 과 Fig. 7 은 이러한 함수 관계를 잘 보여주는 예라고 할 수 있다.

이렇게 구해진 특이길리와 절삭력 사이의 관계는 마이크로 머시닝에서 중요시되는 물성치의 변화에 따른 본질적 치수효과¹¹를 살펴보는 데 유용하게 사용될 수 있다는 점에서 그 의의가 크다고 할 수 있다. 절삭에서 치수효과는 절삭깊이가 작아짐에 따라 공구경사각이 감소함으로 인해 발생하는 가공 기하에 따른 치수효과(공구날의 불완전함으로 인한 치수효과)와 재료 자체의 유동 응력 증가로 인해 발생하는 물성치의 변화에 따른 본질적 치수효과로 구분할 수 있다. 이 중 물성치 변화에 따른 본질적 치수효과를 실험적으로 살펴보기 위해서는 공구날의 특이길리가 0 인(완벽하게 날카로운 공구날을 갖는) 공구를 사용하여 가공 기하에 따른 치수효과를 배제할 필요가 있다. 하지만 공구날 특이길리가 0 인 공구는 실제로는 제작이 불가능하며 설령 제작 가능하다 할지라도 공구의 마모로 인해 정확한 실험이 어렵다. 하지만 Fig. 6 과 Fig. 7 에 주어진 것과 같은 관계식을 이용

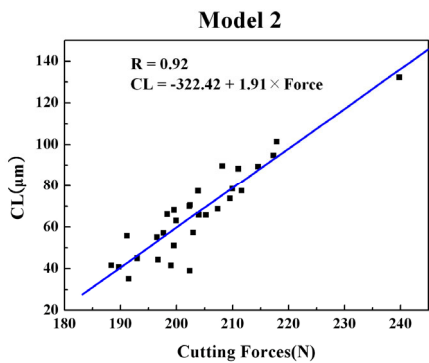


Fig. 6 Correlation between characteristic length and cutting force (depth of cut: 100 μm , rake angle: 0°)

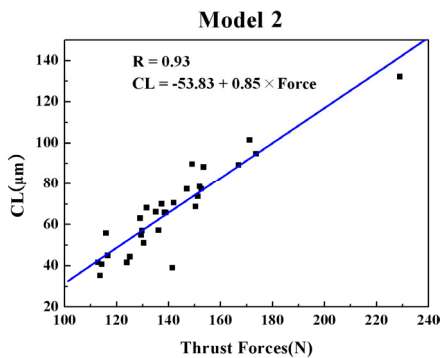


Fig. 7 Correlation between characteristic length and thrust force (depth of cut: 100 μm , rake angle: 0°)

Table 3 Correlation coefficient(R) between the characteristic length and cutting forces

Rake angle (Degree)		5			0			-10			Mean	Standard deviation
Depth(μm)		50	100	150	50	100	150	50	100	150		
Correlation of F_c (R)	Model 1	0.88	0.84	0.82	0.66	0.67	0.71	0.45	0.33	0.27	0.63	0.22
	Model 2	0.86	0.86	0.89	0.84	0.92	0.89	0.78	0.74	0.70	0.83	0.07
	Model 3	0.93	0.90	0.91	0.78	0.82	0.86	0.62	0.53	0.47	0.76	0.17
	Model 4	0.79	0.81	0.84	0.83	0.92	0.88	0.79	0.78	0.74	0.82	0.05
	Model 5	0.56	0.52	0.48	0.61	0.58	0.66	0.51	0.39	0.30	0.51	0.11
Rake angle (Degree)		5			0			-10			Mean	Standard deviation
Depth(μm)		50	100	150	50	100	150	50	100	150		
Correlation of F_t (R)	Model 1	0.87	0.83	0.81	0.74	0.66	0.70	0.50	0.42	0.38	0.66	0.18
	Model 2	0.87	0.86	0.89	0.94	0.93	0.95	0.86	0.84	0.82	0.88	0.05
	Model 3	0.93	0.91	0.91	0.87	0.81	0.85	0.70	0.64	0.60	0.80	0.12
	Model 4	0.80	0.81	0.84	0.92	0.92	0.94	0.88	0.87	0.85	0.85	0.05
	Model 5	0.56	0.50	0.47	0.68	0.57	0.62	0.55	0.46	0.41	0.41	0.08

할 경우 실제 실험을 수행하지 않고도 특이길이 0 인 공구를 사용할 때의 절삭력 값을 추정해 볼 수 있다. 따라서, 다양한 절삭깊이에 대해 이러한 관계식이 주어진다면 공구날의 불완점함에 기인한 치수효과를 배제한, 물성치의 변화에 따른 본질적 치수효과를 손쉽게 살펴 볼 수 있다.

한편, Table 3 은 모든 실험 조건에 대한 특이길이와 절삭력 사이의 상관계수를 보여 준다. 표에서 두 방향(F_c , F_t) 절삭력 모두에서 모델 2 와 모델 4 가 다른 모델에 비해 상대적으로 우수함을 알 수 있는데(상대적으로 큰 Mean 값을 가짐), 이는 Fig. 8 과 Fig. 9 를 통해 보다 명확히 알 수 있다. Fig. 8 은 절삭깊이의 변화에 따른 상관계수의 변화를 모델 별로 보여주는데, 모델 3, 4, 5 의 경우 절삭깊이가 증가함에 따라 상관계수가 감소하는 반면, 모델 2, 3 은 절삭깊이에 관계없이 꾸준히 높은 값을 가지는 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 9 는 공구경사각의 변화에 따른 상관계수(평균값)의 변화를 모델 별로 보여주는데, 모델 3, 4, 5 의 경우 음의 공구경사각에서 낮은 상관계수를 가지며 공구경사각에 따라 심한 편차를 보이는 것을 알 수 있다. 이에 반해, 모델 2, 3 은 공구경사각과 무관하게 비교적 높은 상관계수를 갖는 것을 알 수 있다.

이처럼 모델 2 와 모델 4 가 다른 모델들에 비해 절삭 조건에 관계 없이 높은 상관관계를 가지는 이유와 관련하여 주목해야 할 점은 모델 2 와 모델 4 가 최적 원의 중심(모델 2) 또는 최적 포물

선의 초점(모델 4)이 wedge angle 의 이등분선 상에 있어야 한다는 구속 조건을 공통으로 가지고 있다는 점이다. 절삭 관련 연구에서 이처럼 공구날 형상의 대칭 축 위치가 중요한 의미를 갖는 때는 절삭을 wedge indentation 의 특수한 형태로 바라볼 때

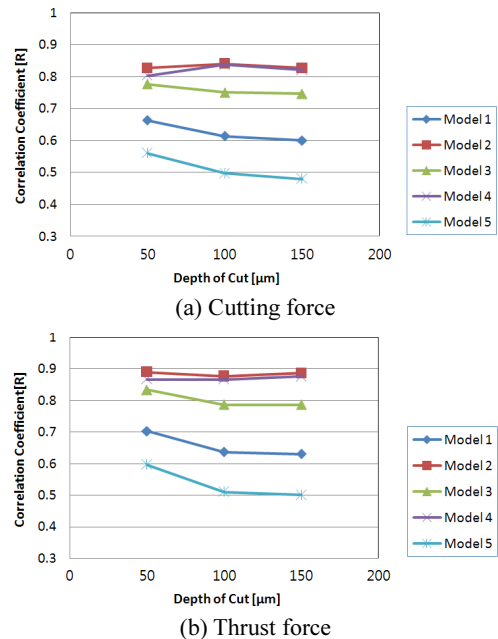
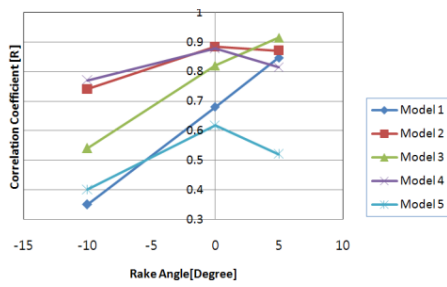
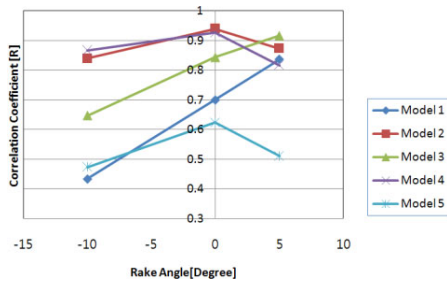


Fig. 8 Variation of correlation coefficient(R, average value) with the change of depth of cut for the rake angle of 5°, 0°, and -10°



(a) Cutting force



(b) Thrust force

Fig. 9 Variation of correlation coefficient(R, average value) with the change of rake angle for the depth of cut of 50 μ m, 100 μ m and 150 μ m

이다.^{12,13} 한 예로, Madhavan 등¹²은 절삭과 wedge indentation 은 indenter 의 모양, 위치, 이동 방향 등에서 차이가 있지만 물리적 현상은 동일하게 모델링 될 수 있다고 가정하고 FEM 해석을 수행하였는데 그 과정에서 절삭에서의 indentation 방향을 공구 wedge angle 의 이등분선과 일치하도록 설정하였다. 이와 관련하여 본 연구에서 밝혀진 모델 2 와 모델 4 에 대한 특이길이의 절삭력과 높은 상관관계는 추후 절삭과 wedge indentation 과의 유사성을 밝히는 연구에 중요한 단서를 제공해 줄 수 있으리라 기대된다.

5. 결론

본 연구에서는 공구날 형상과 크기를 대표할 수 있는 특이길이를 정의함에 있어 물리적 적합성이 우수한 모델을 찾고자 하였다. 이를 위해 먼저 특이길이의 절삭력과 함수 관계를 살펴보았는데 그 결과 특이길이의 절삭력과 함수 관계는 선형적임을 알 수 있었다. 이러한 관계는 특이길이가 0 인 공구로 절삭을 수행할 때의 절삭력을 추정하는데 유용하게 사용될 수 있으며, 이렇게 구해진

값들은 물성치의 변화에 기인한 본질적 치수효과를 살펴보는데 매우 중요하게 사용될 수 있다. 또한, 절삭력과 높은 상관관계를 갖는 특이길이에 대한 모델은 공구날 형상에 부합하는 최적 원의 중심 좌표 또는 최적 포물선의 초점 좌표가 wedge angle 의 이등분선 상에 위치할 때임을 알 수 있었다. 이러한 결과는 추후 절삭과 wedge indentation 과의 유사성을 밝히는 데 중요한 단서를 제공해 줄 수 있으리라 기대된다.

후 기

이 논문은 2011 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2011-0025537).

참고문헌

1. Yen, Y. C., Jain, A. and Altan, T., "A Finite Element Analysis of Orthogonal Machining Using Different Tool Edge Geometries," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 146, No. 1, pp. 72-81, 2004.
2. Woon, K. S., Rahman, M., Fang, F. Z., Neo, K. S. and Liu, K., "Investigations of Tool Edge Radius Effect in Micromachining: A FEM Simulation Approach," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 195, No. 1-3, pp. 204-211, 2008.
3. Liu, K. and Melkote, S. N., "Finite Element Analysis of the Influence of Tool Edge Radius on Size Effect in Orthogonal Micro-Cutting Process," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 49, No. 5, pp. 650-660, 2007.
4. M'Saoubi, R. and Chandrasekaran, H., "Investigation of the Effects of Tool Micro-Geometry and Coating on Tool Temperature during Orthogonal Turning of Quenched and Tempered Steel," International Journal of Machine Tool and Manufacture, Vol. 44, No. 2-3, pp. 213-224, 2004.
5. Childs, T. H. C., Dornfeld, D., Lee, D. E., Min, S., Sekiya, K., Tezuka, R. and Yanmane, Y., "The Influence of Cutting Edge Sharpness on Surface Finish in Facing with Round Nosed Cutting Tools," CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol. 1, No. 2, pp. 70-75, 2008.

6. Asai, S., Horio, K., Kasai, T. and Kobayashi, A., "Measuring the Very Small Cutting Edge Radius for a Diamond Tool Using a New Kind of SEM Having Two Detectors," *Annals of the CIRP*, Vol. 39, No. 1, pp. 85-88, 1990.
7. Ogivie, A. and Chou, K., "Cutting Edge Profile Characterizations by White-Light Interferometry," 2009 ASME Early Career Technical Conference, pp. 19.1-19.8, 2009.
8. Ranganath, S., Hwang, J. and Campbell, A. B., "Experimental Investigation and Mechanistic Modeling of the Effects of Tool Edge Hone Effects in Turning Operations," 2005 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, pp. 833-842, 2005.
9. Hwang, J. and Chandrasekar, S., "Contact Conditions at the Chip-Tool Interface in Machining," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 12, No. 2, pp. 183-193, 2011.
10. Devore, J. L., "Probability and Statistics for Engineering and the Sciences," Duxbury Press, pp. 474-585, 1995.
11. Backer, W. R., Marshall, E. R. and Shaw, M. C., "The size effect in metal cutting," *Transactions of the ASME*, Vol. 74, No. 1, pp. 61-72, 1952.
12. Madhavan, V., Chandrasekar, S. and Farris, T. N., "Machining as a Wedge Indentation," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 67, No. 1, pp. 128-139, 2000.
13. Hutchings, I. M., "Deformation of Metal Surfaces by the Oblique Impact of Square Plates," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 19, No. 1, pp. 45-52, 1977.