

인덱서블 엔드밀링 공정을 위한 향상된 절삭력 모델의 개발

김성준*(포항공대 대학원 기계공학과), 이한울(포항공대 대학원 기계공학과),
조동우(포항공대 기계공학과)

Development of Improved Cutting Force Model for Indexable End Milling Process.

S. J. Kim* (Mechanical Eng. Dept., POSTECH), H. U. Lee(Mechanical Eng. Dept., POSTECH),
D. W. Cho (Mechanical Eng. Dept., POSTECH)

ABSTRACT

Indexable end mills, which consist of inserts and cutter body, have been widely used in roughing of parts in the mold industry. The geometry and distribution of inserts on cutter body are determined by application. This paper proposes analytical cutting force model for indexable flat end-milling process. Developed cutting force model uses the cutting-condition-independent cutting force coefficients and considers runout, cutter deflection and size effect for the accurate cutting force prediction. Unlike solid type endmill, the tool geometry of indexable endmill is variable according to the axial position due to the geometry and distribution of inserts on the cutter body. Thus, adaptive algorithm that calculates tool geometry data at arbitrary axial position was developed. Then number of flute, angular position of flute, and uncutchip thickness are calculated. Finally, presented model was validated through some experiments with aluminum workpiece.

Key Words : Indexable Endmill (인덱서블 엔드밀), Insert(인서트), Cutting force (절삭력), Cutting force coefficient (절삭력 계수)

1. 서론

공작기계를 이용한 절삭 가공은 자동차, 항공기, 기계 부품 그리고 금형 분야 등에 걸쳐서 현대 산업의 여러 가지 가공 방법 중에서 커다란 부분을 차지하고 있다. 절삭 가공이 제품 생산 과정에서 차지하는 비중이 매우 크므로 최적화된 절삭 공정을 통해 생산성을 향상 시킬 수 있다. 절삭 공정의 최적화는 절삭력 예측, 가공 안정성(chatter)평가, 가공 표면 오차 해석, 이송속도 스케줄링 등 절삭 공정의 해석을 통해서 이루어진다^[1,2,3,5].

일반적인 절삭 공정은 황삭, 중삭, 그리고 정삭의 과정을 거치게 된다. 황삭 단계에서는 가공 시간 단축이 생산성에 중요한 영향을 미치며 이를 위해서 직경이 큰 공구를 사용하며 대체로 직경 16mm 이상의 경우에는 인덱서블 엔드밀(Indexable endmill)을 사용한다.

Yun, Ko^[4,5,6] 등은 솔리드 타입(Solid type)의 평 엔드밀과 볼 엔드밀에 대한 절삭력 모델을 개발하였고

이를 바탕으로 가공 표면에 대한 오차 해석과 이송 속도 최적화에 대한 연구를 수행하였다. Engin^[2] 등은 엔드밀의 일반적인 형상을 표현 할 수 있는 변수들을 설정하고 이들 변수를 이용하여 형상에 대해 일반화된 절삭력 모델을 개발하였다. 그리고 예측된 절삭력을 바탕으로 가공 안정성과 가공 표면 오차에 대한 해석을 수행한 바 있다.

반면에 인덱서블 엔드밀에 대한 연구는 솔리드 타입 엔드밀에 대한 연구에 비해 미흡한 편이다. 인덱서블 엔드밀에 대한 절삭 해석은 페이스밀링 공정에 대한 절삭력 예측과 표면 오차 해석 등이 일반적이며, Engin^[2] 등에 의해서 인덱서블 엔드밀에 대한 절삭력 예측과 가공 안정성 해석 그리고 표면 오차에 대한 연구가 이루어진 바 있다. 하지만 Engin 등에 의해 개발된 절삭력 모델은 인서트 절삭날을 직선으로 고려하였고 평균 절삭력 계수를 사용하였다.

본 논문에서는 Yun, Ko^[4,5,6] 등이 개발한 절삭력 모델을 이용하여 인덱서블 엔드밀에 대한 절삭력 모

델을 제시하고자 한다.

2. 절삭력 모델

2.1 인덱서블 엔드밀

절삭 공정에 사용되는 공구는 가공하고자 하는 제품의 형상과 가공물의 소재 등의 용도에 의해서 그 종류와 형상이 달라지게 된다. 일반적으로 널리 사용되는 공구로는 일정한 경사각(Helix angle)과 비틀림각(Rake angle)으로 연속적인 날이 가공되어 있는 솔리드 타입 엔드밀과 공구의 몸체(Cutter body)에 인서트(Insert)를 일정한 위치에 결합한 인덱서블 엔드밀이 있다. 인덱서블 엔드밀은 공구의 크기 및 인서트 열수와 각 열에 결합된 인서트의 수 그리고 각 인서트의 위치, 비틀림각, 경사각 등에 의해서 그 형상이 정의된다.

인덱서블 엔드밀은 솔리드 타입 공구와는 달리, 결합된 인서트의 종류와 위치에 따라 불연속적인 절삭날을 가지므로 공구의 높이에 따른 절삭날의 수, 각 날의 회전 위치, 각 날의 회전 간격 등이 달라진다.

2.2 절삭력 모델

절삭 공구는 미소의 두께를 가진 디스크 요소들의 집합으로 가정할 수 있으며 절삭날은 디스크 요소에 있는 직선의 절삭날 집합으로 가정할 수 있다. 또한 각각의 디스크 요소에서 절삭날에 의한 칩 형성은 3 차원 절삭 공정에 의해 발생한다고 가정할 수 있다. 따라서 절삭 공정에서 발생하는 절삭력은 각 디스크 요소에서 발생하는 힘들의 합으로 계산될 수 있다. 그림 1 은 인덱서블 엔드밀의 형상과 좌표계를 보여주고 있다. 그림 1 에서 알 수 있듯이 적용되는 좌표계와 인서트 날의 형상은 솔리드 타입 공구의 그것과 동일하다. 공구 형상이 정의 되는 값으로서 θ_n 는 축 방향의 비틀림각, α_n 은 반경 방향의 경사각, R 은 공구 반지름이며 Δa 는 단위 디스크의 두께, $\Delta\theta$ 는 공구의 미소 회전각이다. 절삭날부의 반경 방향의 경사면의 면적 (dA_n) 에 작용하는 수직 분력 (dF_{nz}) 과 수평 분력 (dF_{nr}) 은 식(1), (2)와 같이 계산된다. 따라서 전체 절삭력은 공구 경사면 위의 각 분력의 합력이 된다^[4,5].

$$dF_{nz}(\phi) = K_n T(\theta) \vec{n}(\alpha) dA_n \quad (1)$$

$$dF_{nr}(\phi) = K_r K_n T(\theta) \vec{T}_c(\alpha) dA_n \quad (2)$$

$$A_n = t_c(\phi) \cos \alpha_n (\Delta a / \cos \theta_n) \quad (3)$$

여기에서 K_n 과 K_r 는 절삭조건에 독립적인 절삭력 계수^[4,5] 중에서 각각 경사면의 수직 방향의 절삭 저항과 마찰 방향의 절삭 저항을 나타내는 값이다.

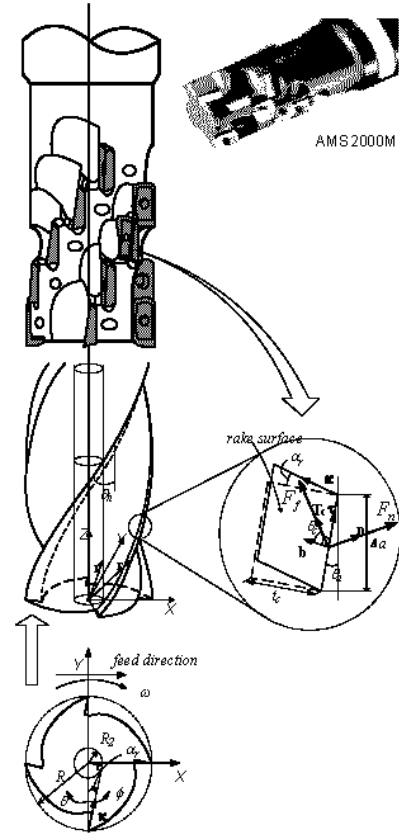


Fig. 1 Cutter geometry of indexable end mill and cutting force components on rake surface.

임의의 회전각에 대한 절삭력은 공구의 형상에 의해서 계산되는 값들과 절삭력 계수, 그리고 미 변형 칩 두께의 곱에 의하여 나타내어진다.

그림 1 과 같이 인덱서블 엔드밀에 의한 절삭 과정은 인서트 날의 경사면에 의해서 이루어진다. 따라서 인서트 날의 위치만 정확하게 계산된다면 위의 절삭력 모델을 이용하여 절삭력 예측이 가능하다. 앞에서 설명한 바와 같이 인덱서블 엔드밀은 비틀림각과 경사각을 갖는 불연속적인 절삭날들로 이루어져 있다. 그림 2 는 2 열의 인서트와 각 열에 4 개의 인서트가 결합된 인덱서블 엔드밀(AMS2025M)의 인서트 위치를 평면으로 보여주고 있다. 인서트의 날 길이(l)와 오버랩 구간의 길이(h)를 이용해서 각 인서트의 최하점(bottom edge position)과 최고점(top edge position) 의 높이를 계산한다. 이상의 공구 형상으로부터 임의의 공구 높이에서의 절삭날의 수와 그 위치를 계산한다. 각 인서트의 최하점($P_b(m, n)$)과 최고점($P_t(m, n)$)은 식 4 와 같다. 식 4 로부터 디스크 요소의 높이를 최하점과 최고점 사이에 포함하는 인서트의 수가 임의의 공구 높이에서 절삭날의 수가 된다. 각 절삭날의 회전각 위치는 $\alpha(i, k)$ 이며 식 5

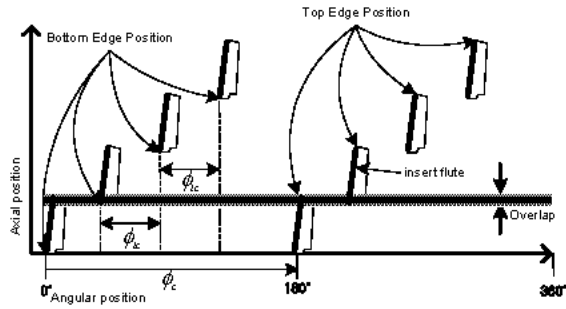


Fig.2 Cutter edge location of Indexable end mill. (AMS2025M)

와 같다.

$$P_b(m, n) = nl \cos \theta_h - \sum_0^{n-1} h \quad (4)$$

$$P_r(m, n) = P_b(m, n) + l \cdot \cos \theta_h$$

$$\alpha(i, k) = \phi_c m + \sum_0^{n-1} \phi_c \quad (5)$$

$$+ (k\Delta a + \Delta a / 2 - P_b(m, n)) \cdot \tan \theta_h / R$$

$$\phi(i, j, k) = \alpha(i, k) - j\Delta \theta \quad (6)$$

따라서 공구의 회전 효과를 고려하면 k 번째 디스크 높이에서의 i 번째 절삭날의 j 번째 회전각에서의 회전 위치는 식 6 과 같이 표현된다. 그림 3 은 절삭 깊이에 포함되는 디스크 요소들에서의 절삭날 수와 그 위치를 계산하는 과정을 나타내고 있다.

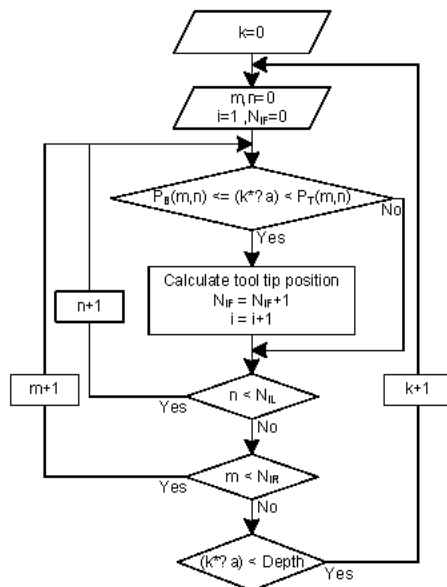


Fig. 3 Algorithm for calculation of the number and angular position of insert flute at k-th disk element.

그림 3 에서 N_{IK} 은 축 방향의 인서트 열 수이고 N_{IL} 은 1 열에 결합된 인서트 수이다. N_{IF} 는 k 번째 디스크 높이에서의 절삭날의 수를 의미한다.

미 변형 칩 두께는 공구의 중심 좌표를 이용하여 계산된다. 공구의 휨 량과 런아웃 효과 그리고 각 디스크 요소에서의 절삭날의 위치를 고려하였으며, 인서트 날의 불연속성으로 인하여 인서트 각 층의 런아웃 값을 독립적으로 적용하였다.

3. 절삭력 모델의 검증

3.1 실험 방법 및 내용

개발된 절삭력 모델을 검증하기 위해서 측면 가공에 대해 여러 실험 조건에서 절삭력 측정 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 공작기계는 DAEWOO ACE V-30 이며 한국야금(주)의 금형 가공용 공구인 AMS2025M 을 사용하였고 그 형상은 표 1 과 같다. 절삭력 측정을 위해 공구동력계(Kistler 9257A)를 사용하였고 가공재질은 Al2024-T4 이다.

3.2 실험 결과

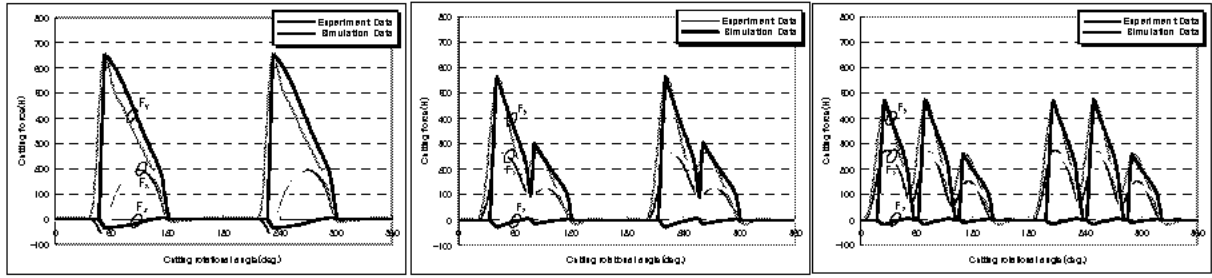
실험에 사용된 각 공구에 대한 절삭력 계수는 표 2 와 같다. AMS2025M 에 대하여 주축 회전속도 1000rpm, 이송 속도 150mm/min 에서 그림 4 와 같은 조건으로 실험을 수행하였고 그림 4 는 공구 1 회전 에 대한 절삭력 측정값과 예측값의 비교 결과이다. AMS2025M 은 날의 길이가 11mm 인 APXT11T3 가 축 방향으로 2 열, 그리고 각 열에 4 개씩 결합되어 있는 구조이다. 따라서 그림 4 에서의 결과를 보면, 2 열의 인서트를 가지고 있으므로 크게 2 구간에서 절삭력이 발생함을 알 수 있다. 절삭 깊이가 증가함에 따라 절삭에 참여하는 인서트의 수가 증가하므로 측

Table 1 Geometry variables of Indexable end mill.

| | Insert | Diameter | Helix/Rake angle |
|----------|---------------------|----------|------------------|
| AMS2025M | APXT11T3 (2 * 4) | 25mm | 9° / -12° |

Table 2 Cutting force coefficients of Indexable end mill.

| | K_n | K_f | θ_c |
|----------|------------|------------|------------|
| AMS2025M | A1=6.73933 | B1=0.30933 | C1=0.27142 |
| | A2=12.8668 | B2=0.93288 | C2=0.20089 |
| | A3=0.28989 | B3=1.23972 | C3=4.63918 |
| | A4=6.32455 | B4=0.47773 | C4=0.45180 |



(a) Depth 8mm, Width 8mm

(b) Depth 15mm, Width 3mm

(c) Depth 25mm, Width 2mm

Fig. 4 Comparison of cutting forces in Indexable end milling @ 1000rpm, 150mm/min(AMS2025M)

정된 절삭력의 유형이 조금씩 변하고 있다. 절삭 깊이가 증가함에 따라 절삭에 참여하는 인서트의 수가 증가하므로 측정된 절삭력의 유형이 조금씩 변하고 있다. 개발된 절삭력 모델에 의한 예측값이 절삭력의 변화를 정확하게 예측함을 알 수 있다.

실험 결과로부터 개발된 절삭력 모델이 하나의 절삭력 계수를 이용하여 여러 조건에서 절삭력 발생 위치와 최고값을 기준으로 약 5%이내의 오차를 보여줌으로써 정확한 절삭력을 예측함을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 인덱서블 엔드밀링 공정에서의 절삭력 예측 모델을 개발하였다. 기존의 슬리드 타입 엔드밀의 절삭력 모델을 기반으로 인덱서블 엔드밀에 적용할 수 있는 모델을 개발하였다. 개발된 절삭력 모델은 디스크의 위치에 따른 절삭날의 수와 위치, 런아웃 값을, 그리고 공구의 힘 량을 고려한 미 변형 칩 무게와 절삭력 계수를 이용하여 절삭력을 예측할 수 있다. 여러 조건에서 인덱서블 엔드밀을 이용하여 절삭력 측정 실험을 하였으며 측정값과 예측값의 비교를 통하여 개발된 모델이 인덱서블 엔드밀링 공정에서의 절삭력을 정확하게 예측할 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 ㈜터보테크 주관의 2003년도 산업기반기술개발사업의 위탁과제의 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. Ehmann, K. F., Kapoor, S. G., DeVor, R. E., and Lazoglu, I., "Machining Process Modeling: A Review," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 119, pp.655-663, 1997.
2. Engin, S., Altintas, Y., "Mechanics and dynamics of general milling cutter. Part I: helical end mills," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 41, pp.2195-2212, 2001.
3. Engin, S., Altintas, Y., "Mechanics and dynamics of general milling cutter. Part II: inserted cutters," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 41, pp.2213-2231, 2001.
4. Jeong Hoon Ko, Won Soo Yun, Dong-Woo Cho, Kornel F. Ehmann, "Development of a Virtual Machining System, Part 1: Approximation of the Size Effect for Cutting Force Prediction", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, Issue 15, December, 2002, pp. 1595-1605.
5. Won Soo Yun, Jeong Hoon Ko, and Dong-Woo Cho, "Development of a Virtual Machine Tool-Part 1: Mechanistic Cutting Force Model, Machined Surface Error Model, and Feed Rate Scheduling Model.", *International Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 4, No.2, March, 2003, pp.71-76.
6. 이한울, 고정훈, 조동우, "향상된 절삭력 모델을 이용한 고속 가공의 이송속도 스케줄링," *한국정밀공학회지*, 2003년도 춘계 학술대회논문집, 제주, 오리엔탈호텔, pp. 141-144, 2003.