

계단형상 체적의 엔드밀 가공시 절삭력 변화 특성에 관한 연구

맹희영^{a*}

Cutting Force Variation Characteristics in End Milling of Terrace Volume

Heeyoung Maeng^{a*}^a Dept. of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science & Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 139-743, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	30	March	2013
Revised	12	April	2013
Accepted	15	April	2013

Keywords:

End milling
Terrace volume
Tool diameter factor
Cutting depth factor
Cutting force prediction model

ABSTRACT

This study analyzed the variation in the cutting force when the cutting area of a terrace volume is machined, which is generally left after the rough cutting of a sculptured surface. The numerically simulated results for the cutting forces are compared with cutting force measurements by considering the theoretical prediction of the cutting area formation and specific cutting volume. The variation in the cutting force is measured using a dynamometer installed on a machining center for 19 different kinds of test pieces, which are selected according to the variation in the terrace volume factor, tool diameter factor, and cutting depth factor. As a result, it is verified that the cutting forces evaluated by the numerical analysis coincide with the measured cutting forces, and it is proposed as a practical cutting force prediction model.

1. 서론

엔드밀 가공은 홈이나 각주형 공작물을 가공하는 데에 다양하게 사용되고 있으며, 최근에는 CAM 기술의 발전과 더불어 자유곡면의 황삭 과정에서 계단형상의 체적을 경사방향으로 절삭하는 데에도 널리 사용되고 있다. 엔드밀로 자유곡면을 가공할 때, 횡방향으로 절삭하는 경우에는 절삭력 변화가 크지는 않으나 표면거칠기가 떨어지고, 경사방향으로 절삭하는 경우에는 가공표면의 표면거칠기는 좋아질 수 있으나 커터에 작용하는 절삭력 변화가 커서 형상 오차가 크게 발생될 우려가 있다^[1]. 그리고 엔드밀 가공에서 가공 오차는 주로 엔드밀에 작용하는 절삭력에 의해 발생되며, 절삭력은 엔드밀의 형상, 칩 부하, 피삭재 재질 등에 의해 다양한 변화를 일

으킨다. 다른 유형의 가공에 비하여 엔드밀은 외팔보 형태로 스핀들에 고정되기 때문에 절삭력이 작용하면 엔드밀 처짐이 쉽게 일어나고 가공오차도 크게 되는 특징이 있다.

엔드밀의 가공정밀도에 관한 연구로는 가공 중 엔드밀 중심 위치를 편위시켜서 오차를 보상하는 공구 틸팅 장치 개발^[2], 절삭력이 일정하게 작용할 수 있도록 가변 이송을 통해 가공정밀도와 표면 굴곡도를 향상시키는 방안^[3], 그리고 실시간 공구 처짐 보정시스템^[4] 등 많은 선행 연구가 있었으며, 대부분 이들 연구는 엔드밀에 작용하는 절삭력 예측 모델을 기반으로 하고 있다. 그러나 아직까지 자유곡면 형상의 황삭가공 과정에서 계단형상의 체적을 경사방향으로 절삭할 때의 절삭력 예측 모델은 연구된 적이 없으며, 그 때문에 자유곡면을 경사진 방향으로 황삭 가공할 때 가공조건을 지정한다

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6363

Fax: +82-2-974-8270

E-mail address: maeng@seoultech.ac.kr (Heeyoung Maeng).

든지 가공정밀도를 평가하는 데에 필요한 기초 자료가 부족한 실정이다.

따라서 본 연구는 계단형상의 체적을 경사진 방향으로 가공할 때 절삭력이 어떻게 변화하는지를 예측하고자 하였다. 계단형상의 기하학적 변수에 따라 구분될 수 있는 여러 절삭 유형을 분류하고 각 유형에 알맞은 엔드밀 가공 기구를 적용하여 이를 수치적으로 계산할 수 있는 수치해석 모델을 제안하였다. 그리고 실험을 통해 이 수치해석 모델이 다양한 계단형상 변수에 대해서 실험 결과와 잘 일치하는지를 검증하였으며, 그 결과를 통해 계단형상 변수에 따라 x, y, z 방향의 최대 절삭력 파형이 어떻게 변화하는지를 고찰하였다. 궁극적으로는 이를 이용하여 계단형상의 경사방향 절삭시 가공조건을 설정하거나 가공정밀도를 향상시키기 위한 기초 자료로 활용할 수 있도록 하였다.

2. 절삭력 특성의 수치해석 방법 및 결과

계단형상의 체적을 경사진 방향으로 엔드밀 가공할 때 기초적인 형상 파라미터로는 Fig. 1과 같이 계단폭 W , 높이 H , 그리고 축방향 절삭깊이 d_a 로 설정하였으며, 절삭력 거동을 수치해석하기 위한 초기 입력조건으로는 엔드밀 반지름 R , 날수 z , 비틀림각 β , 접선 방향, 반경방향 및 축방향의 비절삭저항 K_t, K_r, K_z 등의 상수로, 그리고 절삭 중 가변되는 변수로는 엔드밀이 회전하는 주기마다 결정되는 반경방향 절삭깊이 d_r 과 절삭작용각 ϕ 로 하였다^[5,6].

절삭날이 1회전할 때 1개의 절삭날에 발생하는 절삭력은 Fig. 1(b)에서와 같은 미소 절삭날 $dz(=R/\tan\beta \cdot d\phi)$ 가 공구가 회전

함에 따라 절삭 개시각(ϕ_1)에서 절삭 종료각(ϕ_2)까지 칩두께가 점차 커지면서 실 절삭을 일으키고, 일정한 시간적 주기마다 이들 미소 절삭날에 작용하는 힘들이 x, y, z의 각 방향에 대한 벡터 합으로 환산하여 구할 수 있는 것으로 하였다^[7,8].

이에 따라 절삭력을 수치해석하는 과정에서는 미소 절삭날이 절삭작용각 $\delta(=d_a/R \cdot \tan\beta)$ 가 ϕ_1 에서 ϕ_2 까지 회전하는 동안 계단형상을 고려한 체적 내에서 절삭이 이루어지는지의 여부를 판단할 수 있는 알고리즘을 적용하였다. 즉, Fig. 1(a)에서와 같이 절삭날 끝의 좌표(A점), 엔드밀 끝의 x축 좌표(B점), 엔드밀의 중심 좌표(C점)가 엔드밀 원통면이 평면에 펼쳐진 모양의 절삭 영역(Fig. 2) 내에서 어느 상태에 위치하는가를 식별하여 절삭이 일어나는지를 판단할 수 있도록 하였다. 이때 미소 절삭날들은 축방향의 위치마다 각각 헬릭스 각도만큼씩 위상차를 가지면서, 또한 위상각 ϕ 에 따라 절삭날의 비변형 칩두께도 점점 두꺼워지기 때문에 미소 절삭날에 작용하는 칩 부하를 계산할 때에는 비변형 칩두께의 크기 변화도 함께 고려하였다 (Fig. 2의 위 부분).

이때 축방향으로 위치한 미소 절삭날들에 작용하는 칩 부하는 Fig. 3에서 볼 수 있는 바와 같이 계단폭, 높이, 그리고 축방향 절삭깊이의 크기에 따라 Type I~IV까지의 4가지 유형으로 구분하여

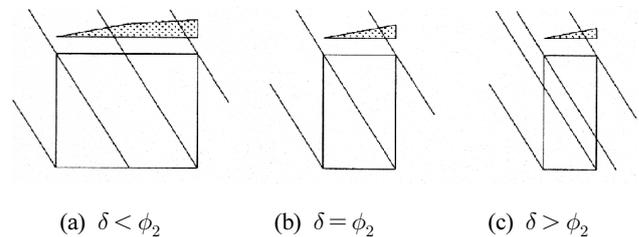


Fig. 2 Type of chip load to the relation of δ and ϕ_2

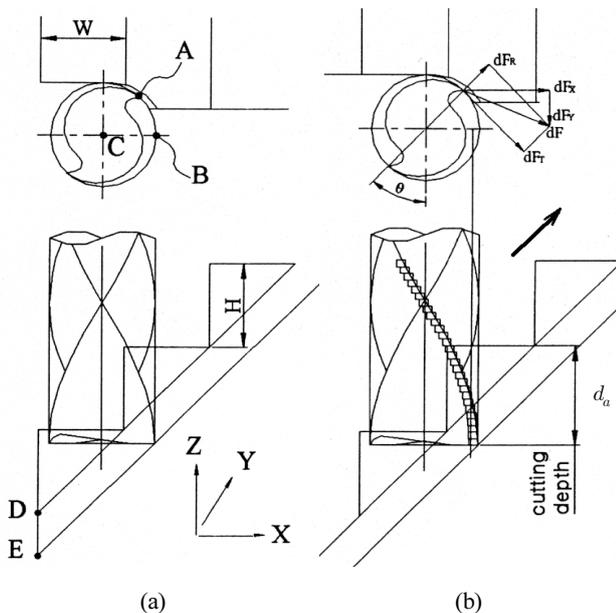


Fig. 1 Cutting mechanism of terrace volume

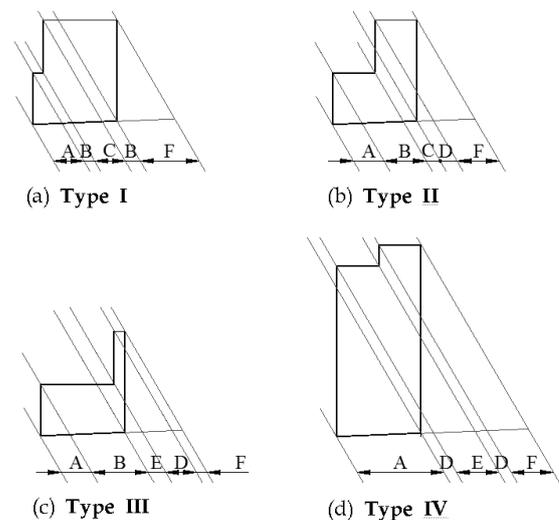


Fig. 3 Simulated paths of cutting edge at a plane

계산할 수 있다. 그리고 엔드밀의 원통면을 Fig. 3과 같이 평면에 펼쳐서 나타낼 때, 각 유형의 절삭 영역에 대해서는 그림과 같이 A~F까지의 6가지의 절삭 패턴을 거치면서 절삭하기 때문에, 각각 미소 절삭날에 작용하는 칩두께가 x, y, z 방향으로 변환된 후 누적되어 계산되도록 하였다(A : 절삭 깊이와 칩두께가 0부터 커지는 경우, B : 절삭 깊이는 일정하나 칩두께는 커지는 경우, C : 절삭 깊이와 칩두께가 초기 크기부터 점점 커지는 경우, D : 절삭

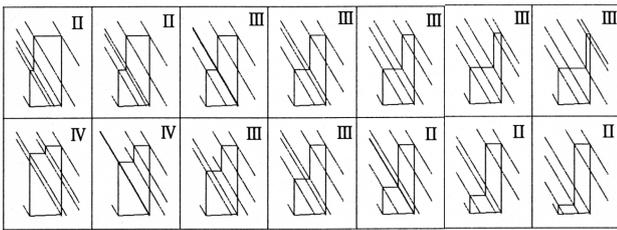


Fig. 4 Changing mode of cutting type in case of $\delta > \phi_c$

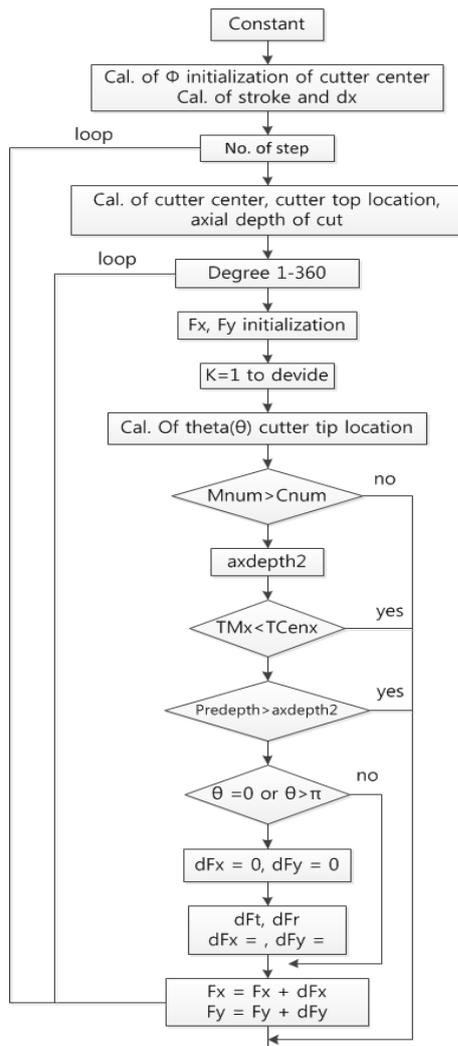


Fig. 5 Process diagram for cutting force evaluation

깊이와 칩두께가 모두 일정하여 절삭력도 일정한 경우, E : 칩두께는 커지나 절삭 깊이는 감소하는 경우, F : 칩두께는 일정하고 절삭 깊이가 감소하는 경우). 아울러 엔드밀이 경사방향으로 가공할 때 이와 같은 절삭 유형 또한 수시로 변하게 되는데, δ 와 ϕ_c 의 크기에 따라 위의 Type I~IV의 유형을 주기적으로 거치게 된다. 대표적인 유형으로 Fig. 4는 $\delta > \phi_c$ (여기서 $\phi_c = \phi_2 - \phi_1$)인 경우에 대한 절삭 유형의 변화를 나타내었다.

한편 이들 변화 과정을 일관성 있게 계산하기 위해서는 계단형상의 기하학적 변수들을 3가지의 대표 척도로 표현하였는데, 이를 위해 절삭 깊이계수($R_\delta = (d_a - H)/H$), 계단형상계수($R_{HW} = H/W$), 공구 지름계수($R_{DW} = D/W$) 등의 3가지 변수로 정의하였다.

그리고 이상과 같은 계산 과정을 통해 1개의 절삭날에 대해 계산된 절삭력은 엔드밀의 절삭날 수 z를 고려하여 다음 절삭날에 대하여 동일한 알고리즘으로 계산되도록 하였고, 전체 절삭날에 작용하는 절삭력은 각각의 절삭날에 대한 x, y, z 성분이 중첩되어 절삭력이 산출되도록 하였다. Fig. 5은 이와 같은 계산 알고리즘을 순서대로 표현하여 나타낸 것이다.

주어진 시간 주기마다 위 계산과정이 반복되도록 함으로써 최종적으로 절삭력 크기들에 대한 데이터가 축적되도록 하였으며, 이를 통해 절삭력 파형의 최대값과 최소값, 그리고 파형의 변화 특성을 예측할 수 있도록 하였다.

3. 검증 실험 조건 및 방법

앞서 해석되었던 절삭력 산출 알고리즘의 계산 결과들이 실제 절삭 과정과 잘 일치하는 지를 실험적으로 검증하기 위해, 절삭폭은 Table 1과 같이 4 mm, 8 mm의 2가지로 하였고, 1개의 시편 가공이 끝날 때마다 엔드밀을 교환하여 공구 마모에 의한 영향을 최소화 되도록 하였으며, 머시닝센터에서 z축 가공 시작점의 높이가 일정하게 되도록 CAM 시스템에서 가공 형상을 모델링한 후

Table 1 Experimental conditions for experiment

End-Mill	material	HSS
	helix angle	30°
	diameter	16 mm
	no. of teeth	2 blade
	nominal length	54 mm
Cutting condition	feedrate	60 mm/min
	spindle speed	500 rpm
	width of cut	4 mm, 8 mm
Machining method	cutting fluid	None
		Up-milling

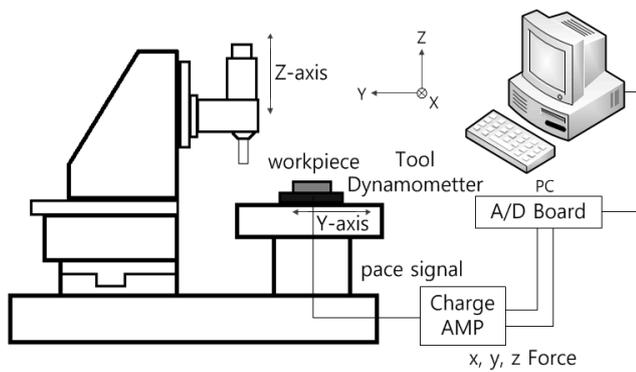
각 절삭 파라미터를 지정하여 출력된 NC 데이터를 이용하였다.

시편의 재질은 SS41을 사용하였으며 엔드밀은 지름 16 mm의 2날 HSS엔드밀을 사용하였으며, 가공은 계단형상의 체적을 경사진 방향으로 상향 절삭을 하였다. 한편 시편은 여러 유형의 계단형상에 대한 절삭력 변화 특성을 비교하기 위하여, 계단형상의 기울기는 8가지, 계단 폭과 높이에 대한 경우의 수는 5가지, 절삭깊이에 대한 경우의 수는 6가지 등으로 조합시켜, 총 19가지를 실험 대상으로 제작하였다. 본 실험에 적용한 계단형상계수(R_{HW}), 공구지름계수(R_{DW}), 절삭깊이계수(R_δ)의 값은 Table 2와 같다.

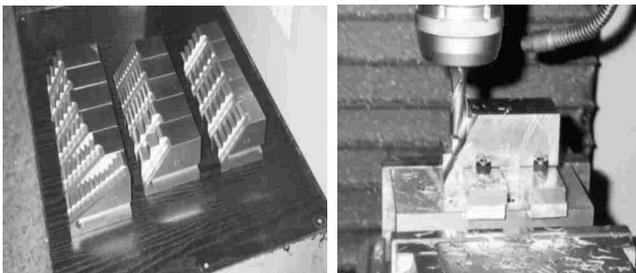
Fig. 6은 전체 실험장치의 구성도와 준비된 시편면, 그리고 계단형상 체적을 경사방향으로 절삭하는 장면이다. 절삭력을 측정하기 위한 공구동력계로는 Kistler사의 9257B형 동력계를 사용하였고, 여기서 얻어진 신호는 charge 앰프를 거쳐서 A/D 변환 카드를 통해 데이터가 수집되도록 하였다.

Table 2 Geometric factors of test-pieces

Factor \ No.	1	2	3	4	5	6	7	8
R_{HW}	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8
R_{DW}	1	1.5	2	2.5	3	3.5	-	-
R_δ	0.1	0.3	0.5	0.7	1.0	-	-	-



(a) Experimental apparatus



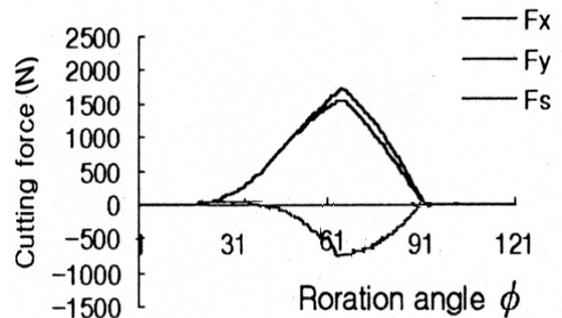
(b) Test-pieces and cutting process

Fig. 6 Setup of experimental apparatus and test-pieces

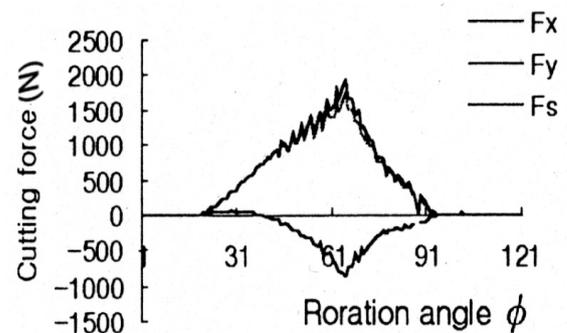
4. 실험 결과 및 고찰

4.1 절삭력 예측 모델의 적합성 검토

앞의 Fig. 5에서 제안되었던 절삭력 예측 모델의 적합성을 검토하기 위해서 먼저 실험을 통해 비절삭저항 K_f 와 K_r 을 구하는 실험을 실시하였는데, 이는 절삭폭과 축방향 절삭깊이가 모두 8 mm이면서 한 계단을 절삭($\delta < \phi$ 조건을 만족)하는 경우를 대상으로 하였다. 이때 엔드밀이 1회전하는 동안 수치계산에 의한 절삭력 파형의 크기가 실험에 의해 수집된 절삭력 파형의 크기와 근사치에 도달할 때를 기준으로 비절삭저항 값들을 구하였다. 그 결과 K_f 값은 1750 N/mm^2 , K_r 값은 1210 N/mm^2 , K_z 값은 105 N/mm^2 등으로 산출할 수 있었다. Fig. 7(a)는 이들 비절삭저항 값과 Table 1에서 주어진 조건을 Fig. 5에서 주어진 수치계산 과정에 대입하여 얻는 절삭력 파형(1° 마다 주기적으로 수치계산)으로 실험에 의해 얻은 절삭력 파형 결과(Fig. 7(b))와 비교적 그 크기뿐만 아니라 모양에 있어서 잘 일치하고 있다. 다만 수치계산 결과는 엔드밀의 동특성이 고려되지 않은 수치계산 모델이므로 F_x 의 최대치의 경우에는 실험 결과보다는 5% 정도 작은 값을 보이고 있다.

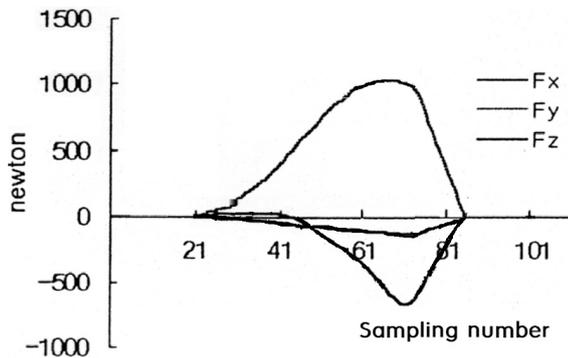


(a) Numerical calculation

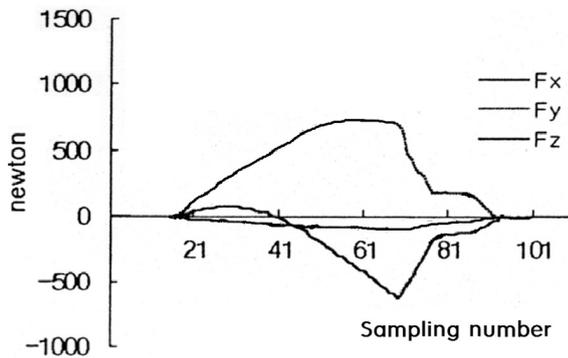


(b) Experimental measurement

Fig. 7 Comparison of numerical calculation of cutting force profile with experimental measurement



(a) Case of Type I

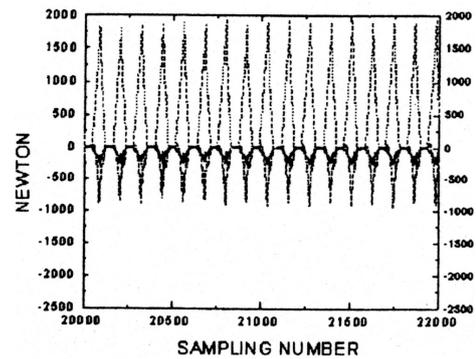


(b) Case of Type III

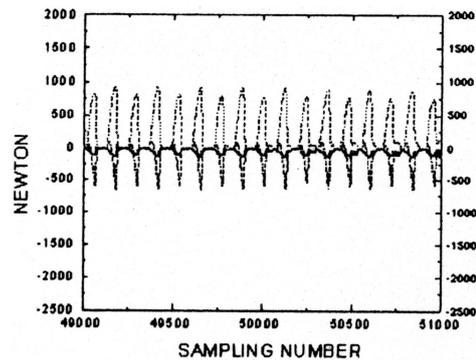
Fig. 8 Cutting force difference between Type I and Type III of stepped terrace volume

다음으로는 엔드밀이 2개 이상의 계단형상을 걸치면서 가공하는 경우(앞의 Fig. 3에서 보았던 Type I~IV의 여러 절삭 유형을 거치면서 가공)에 대해 수치계산의 적합성을 검토하였는데, Fig. 8에서와 같이 Type I의 경우에는 절삭력 F_x 의 피크 부위에서 둔화되는 현상을 보이고 있고, Type III의 경우에는 피크 부위뿐만 아니라 파형의 이탈 부위에서도 불규칙한 현상을 보이고 있으며, 최대값에 있어서도 Type III는 Type I 보다 상당히 작아짐을 보여주고 있다. 또한 경사방향으로 절삭이 진행됨에 따라 절삭력 파형은 Type I 또는 IV의 절삭 유형에서 Fig. 9(a)와 같이 최대치에 도달하였다가, Type III의 절삭유형에서는 Fig. 9(b)와 같이 최소치로 변하면서 파형도 불규칙하게 변함을 알 수 있었다. 이러한 수치계산 모형에 의한 절삭력 파형의 크기와 변화 추세를 실험 결과와 비교할 때 최대 20% 정도의 오차를 보이는 경우도 있었지만 전반적으로 그 크기와 모양에 있어서 비교적 잘 일치함을 검토할 수 있었다.

또한 절삭폭을 4 mm와 8 mm로 한 경우의 수치계산 결과도 실험 결과와 비교하여 보았는데, F_y 와 F_z 는 거의 변화가 없으나 F_x 는 2배 이상 증가하는 특성이 수치계산 결과와 실험 결과의 모두에 잘 나타나고 있었다.



(a) Maximum state at Type I



(b) Minimum state at Type III

Fig. 9 Variation of cutting force magnitude during upward cutting of stepped terrace volume

4.2 절삭깊이계수에 따른 최대 절삭력 크기

절삭깊이계수 R_d 값의 변화에 따른 절삭력 변화 특성을 알아보기 위해 계단의 폭과 높이를 일정하게 한 후, 절삭깊이만을 변화시켜 가면서 수치계산 모형에 적용시켜 보았고, 이를 측정된 절삭력 크기와 비교하여 보았다.

절삭력의 수치계산 과정은 절삭깊이계수의 크기에 따라서 Fig. 10과 같이 Type I~III의 절삭 유형을 순환적으로 거치면서 계산되는 것을 확인할 수 있었으며, 그 결과들은 $R_d > 0.5$ 인 경우에는 앞서 보았던 Fig. 8 및 Fig. 9와 유사한 절삭력 파형을 나타냈다. 이에 반해 R_d 가 0.5보다 작은 경우에는 축방향 절삭깊이가 작을 뿐만 아니라 Type I에 해당하는 절삭 유형도 거치지 않기 때문에 일반적으로 절삭력 크기는 현저하게 작아지는 현상을 나타내었다.

또한 이들 수치계산 결과들은 실험 결과와 비교하였는데, 파형의 크기와 모양에서 모두 일치하였다. 한편 엔드밀의 처짐 요인과 관련하여 최대 절삭력 크기는 가공오차 발생의 주된 척도로 사용될 수 있으므로 본 연구에서는 절삭깊이계수의 크기에 따라 최대 절삭력 크기의 변화 추세를 검토하였으며, 그 결과는 Fig. 11과 같이 나타났다. 절삭깊이계수가 작아질수록 최대 절삭력 크기도 작아짐

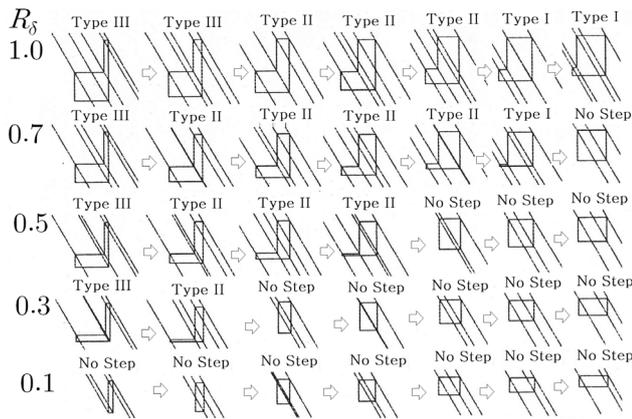


Fig. 10 Changing mode of cutting type with respect to the cutting depth factor of terrace volume

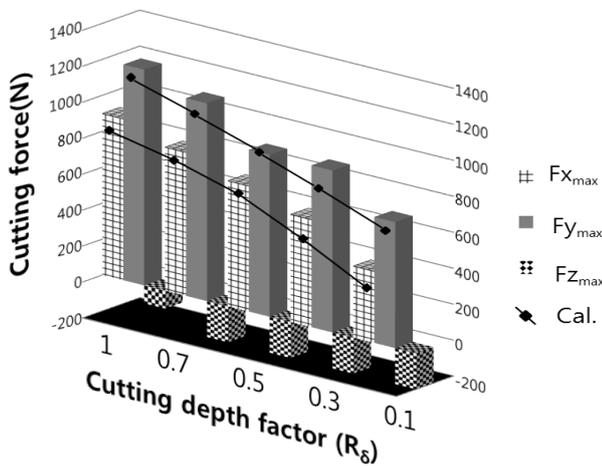


Fig. 11 Variation of maximum cutting force with respect to the cutting depth factor R_δ

을 알 수 있었으며, R_δ 가 1.0인 경우와 0.1인 경우를 비교하면 $F_{x_{max}}$ 는 약 2.5배 정도 차이를 보이고 있고, $F_{y_{max}}$ 이 경우는 약 2배 정도 차이를 보이고 있다.

수치계산 결과는 실험치 보다는 대부분 2~15% 정도로 작게 나오고 있는데, 이는 계단형상이 있는 가공의 경우가 계단형상이 없는 경우보다 동적으로 불안정하여 발생하는 오차로 생각된다.

4.3 계단형상계수에 따른 최대 절삭력 크기

계단형상의 특징 인자인 계단형상계수(R_{HW})가 증가할수록 Type I~IV 사이의 절삭 유형 변화는 더욱 심하게 자주 바뀌게 됨을 수치계산 과정을 통해 알 수 있었으며, 이는 실험 결과와 유사한 결과를 나타내었다. 이같은 심한 변화는 계단형상계수가 증가할수록 계단의 높이가 높아지고 가공 경사각도 커지기 때문으로 생각

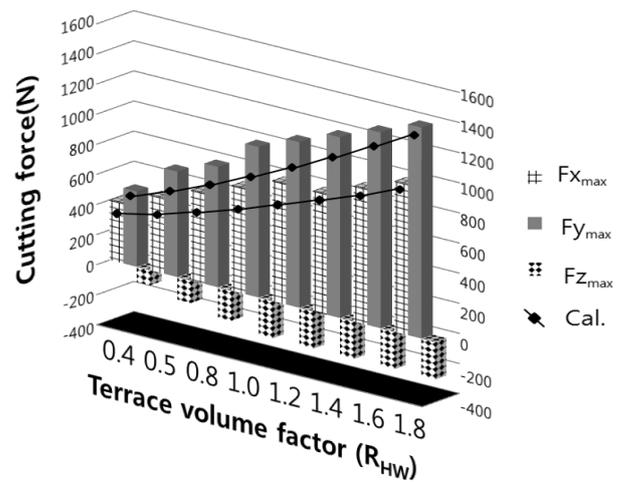


Fig. 12 Variation of maximum cutting force with respect to the terrace volum factor R_{HW}

된다. 또한 최대 절삭력 크기에 있어서도 Fig. 12와 같이 계단형상계수가 커지면 커질수록 빠른 증가율을 보였다. R_{HW} 가 0.4인 경우와 1.8인 경우를 비교하면 $F_{x_{max}}$ 보다는 $F_{y_{max}}$ 의 경우가 더 빠른 증가율을 보이는데, 최대 2.8배 정도까지 증가하였다.

그리고 수치계산 결과는 실험치와 비교하였을 때 계단형상계수가 1.0 값 근처에서 가장 큰 오차를 나타내고 있는데, 이는 경사각이 45° 정도일 때가 동적으로 가장 불안정한 단속절삭 상태이기 때문으로 생각된다.

4.4 공구지름계수에 따른 최대 절삭력 크기

공구지름계수에 따른 절삭력 변화 특성은 엔드밀의 지름을 일정하게(지름 16 mm)하고 계단의 폭을 변화시키면서 비교하였다(이때 계단의 높이는 폭과 동일). 공구지름계수가 커질수록 공구지름에 비해 절삭폭이 작기 때문에 절삭 유형은 더욱 자주 바뀌게 됨을 수치계산 과정을 통해 알 수 있었으며, 이는 실험 결과와도 일치하였다. 최대 절삭력 크기에 있어서는 Fig. 13과 같이 공구지름계수가 커지면 커질수록 최대 절삭력 크기는 작아지는 현상을 보였다.

이는 공구지름계수가 커질수록 절삭작용각 또한 커지기 때문에 상대적으로 절삭력이 분산된 결과로 판단된다. 그리고 최대 절삭력 크기의 감소율은 $F_{x_{max}}$ 보다는 $F_{y_{max}}$ 의 경우가 더 빠른 감소율을 보이는데, R_{DW} 값의 크기에 역 비례하여 감소하는 현상을 보였다(최대 3.2분의 1까지 감소). 한편 수치계산 결과를 실험치와 비교하였을 때에는 공구지름계수가 1.0인 경우 가장 큰 오차를 나타내고 있고, 공구지름계수가 커질수록 수치계산 결과와 실험 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다. 이와 같은 특성은

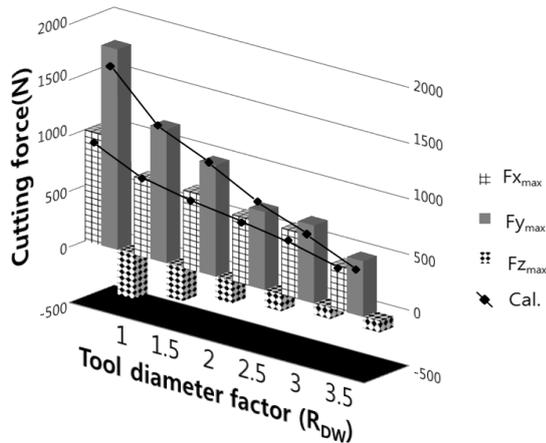


Fig. 13 Variation of maximum cutting force component with respect to the tool diameter factor R_{DW}

공구지름계수가 커질수록 계단형상이 없는 가공 유형에 가까워지고 또한 가공 상태도 동적으로 안정화되기 때문에 나타난 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 계단형상의 체적을 경사방향으로 상향 절삭할 때를 대상으로 엔드밀에 작용하는 절삭력 변화 특성에 대한 수치해석 모델을 제안하였고, 이는 절삭깊이계수, 계단형상계수, 공구지름계수를 변화시키면서 실험한 절삭력 측정 결과와 비교할 때 최대 20% 오차범위에서 일치하였다. 절삭 유형은 절삭폭과 축방향 절삭깊이, 계단의 폭과 높이 등에 따라 크게 4가지의 유형이 나타나며, 이들 절삭 유형은 절삭이 진행됨에 따라 주기적으로 변하면서 절삭력 파형의 크기와 모양을 결정하는 주된 요소가 됨을 알 수 있었다.

한편 절삭깊이계수가 작아질수록 최대 절삭력 크기도 작아지며, 계단형상이 있는 가공의 경우가 계단형상이 없는 경우보다 동적으로 불안정해 지고 있었다. 계단형상계수가 증가할수록 계단의 높이가 높아지고 가공 경사각도 커지기 때문에 절삭 유형은 자주 심하게 바뀌게 되는 현상을 보였으며 최대 절삭력 크기도 증가하는 추세를 보였다. 그리고 공구지름계수가 커질수록 절삭작용각은 커지고 절삭력은 분산되며 이에 역 비례하여 최대 절삭력 크기는 감소하는 특성을 보였다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 일반과제 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Centinkunt, S., Tasii, T., 1999, Position Error Compensation of Contour End-Milling, *Int. J. Mach. Tools & Manufacture*, 30:4 613-620.
- [2] Bae, H. J., Park, H. S., 2004, Analysis of Working Factors for Improvement of Surface Roughness on High Speed End-Milling, *Journal of Korean Society of Precision Engineering*, 21:6 52-59.
- [3] Altintas, Y., Yellowley, I., 1989, In-process Detection of Tool Failure in Milling Using Cutting Force Models *Trans. of the ASME, J. of Engineering for Industry*, 111:1 149-157.
- [4] Watanabe, T., Iwai, S., 1983, A Control System to Improve the Accuracy of Finished Surfaces in Milling, *Trans. of the ASME, J. of Engineering for Industry*, 105:3 192-199.
- [5] Tam, J. H., Tomizuka, M., 1989, On-line Monitoring of Tool and Cutting Conditions in Milling, *Trans. of the ASME, J. of Engineering for Industry*, 111:4 206-212.
- [6] Kline, W. A., Devor, R. E., 1982, The Prediction of Surface Accuracy in End Milling, *Trans. of the ASME, J. of Engineering for Industry*, 104:2 272-278.
- [7] Kim, B. J., 2001, A Study on Cutting Force Characteristics in the End Milling of Rough Cut Terrace Volume Master Thesis, Seoul National Univ. of Science & Technology, Republic of Korea.
- [8] Kim, D. H., Kim, J. S., Woo, Y. W., Lee, H. H., 2007, A Study on the Performance Evaluation of End Mill Tool Fabricated by Ultra-Fine WC, *Journal of the KSMTE*, 16:6 1-8.