

엔드밀링에서 절삭력 방향변동에 관한 고찰

송태성*, 고태조#, 김희솔**, 이지형***

Study on the Change of Cutting Force Direction in Endmilling

Tae Seong Song*, Tae Jo Ko#, Hee Sool Kim** and Ji Hyung Lee***

ABSTRACT

End-milling is intermittent cutting process performed by a tool with a number of teeth. Its cutting forces are commonly measured by the tool dynamometer which has rectangular coordinates. In this case, the pattern of cutting forces is different according to cutting conditions. At a certain cutting condition, the sign of cutting force changes from positive to negative during a revolution of one tooth. The change of force direction excites a cutting tool and severe vibration arises when radial depth of cut increases. In this study, cutting experiments and simulations were carried out in order to explain the cause of the change of the cutting force direction. In addition, the effect of the cutting force change was discussed in terms of chatter vibration in end milling.

Key Words : End-milling (엔드밀링), Cutting force (절삭력), Specific cutting resistance (비절삭저항), Cutting force direction (절삭력 방향)

1. 서론

오늘날 기계·금속 산업의 비약적인 발전과 더불어 엔드밀링은 고정밀도, 고효율성을 위한 절삭 공정으로 자동차산업, 우주항공산업 및 금형산업 등을 비롯한 정밀기계 분야에서 광범위하게 사용되고 있다. 엔드밀링은 공작물의 이송운동과 공구의 회전운동으로 미변형칩두께가 주기적으로 변화하는 단속절삭공정이다. 이러한 엔드밀링은 공작물의 이송 속도 방향과 공구의 회전 속도 방향이 서로 상반되는 상향 절삭과 두 속도 방향이 동일한 하향 절삭으로 분류할 수 있다.¹ 엔드밀링 공정에

대한 연구로는 Martellotti² 가 엔드밀링의 상향 및 하향 절삭방식의 기하학적인 차이와 그로 인한 절삭력 및 표면조도의 영향을 밝힌 이래로, Tlustý³ 등이 공구의 수명 또는 공구 파괴와 밀접한 관계를 갖는 중요한 인자인 절삭력에 대하여 엔드밀링의 절삭력 예측 모델을 제시하였다. Kline^{4,5} 등은 밀링 가공에서 공구런아웃의 영향, 가공표면의 품질을 높이기 위한 연구 등 많은 연구를 수행하였다. 특히 공구 동력계에 의해 측정되는 절삭력을 바탕으로 하는 연구가 지속적으로 보고 되고 있다.⁶ 그러나 공구 동력계로부터 측정되는 절삭력 파형은 공구 한 날이 1 회전 하는 동안 재료의 특성,

접수일: 2007 년 1 월 2 일; 게재승인일: 2007 년 6 월 29 일

* 영남대학교 기계공학과 박사 후 연구원

교신저자: 영남대학교 기계공학과

E-mail: tjko@yu.ac.kr Tel. (053) 810-2576

** 영남대학교 기계공학과

*** 영남대학교 대학원 기계공학과

공구의 기하학적인 형상 및 절삭조건에 따라 양의 방향 및 음의 방향으로 변동이 발생할 수 있음에도 이에 대한 체계적인 규명은 이루어지지 않고 있다.

따라서 본 논문에서는 이영문⁷ 등이 제시한 하향 절삭력 예측 모델을 일부 수정하여 본 논문에서 설정한 공구동력계의 방향과 공구 시작 기준점에 따라 다시 설정하고 실제 절삭 실험과 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션을 통하여 양의 방향 및 음의 방향으로의 절삭력 방향변동에 대한 원인 규명을 시도하였다. 또한 이러한 절삭력 방향변동이 채터진동에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

2. 절삭력 모델

2.1 하향 엔드밀링의 절삭력 표현

Fig. 1 은 하향 엔드밀링 공정을 나타낸 것으로 Fig. 1(a)에서 보는 바와 같이 절삭 영역은 측면 절삭날에 의한 주 전단역과 밀날 절삭날에 의한 전단역, 그리고 접촉 및 미끄럼이 발생하는 영역 등으로 구분할 수 있다. 그러나 본 논문에서는 Fig. 1(b)에 나타낸 바와 같이 피삭재 일부의 홈가공으로 밀날에 의한 영향을 배제하였으며, 따라서 복잡한 기하학적 관계를 갖는 3 차원 모델을 2 차원 모델로 단순화할 수 있도록 하였다.

Fig. 2 는 하향절삭에서 공구가 임의의 회전각 ϕ 만큼 회전하며 공작물이 날당 이송량인 S_f 만큼 이송할 때, 주기적으로 변화하는 미변형칩두께 h 를 도식적으로 나타낸 것이다.

절삭력 모델 좌표계를 설정하기 위하여 수직축인 X 축을 기준으로 공구가 절삭을 개시하기 직전까지의 회전각을 ϕ_1 , 절삭을 개시하여 공작물을 빠져나갈 때까지의 회전각을 ϕ_2 로 정의하였으며, 미변형칩두께 h 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$h = S_f \sin(\phi_1 + \phi) \quad (1)$$

이때 공작물과 공구의 상대 속도에 따른 영향은 배제하였다.

Fig. 3 은 하향 엔드밀링시 공구의 회전에 따른 절삭면적을 펼쳐서 나타낸 것으로 반경방향 절삭깊이를 a , 축방향 절삭깊이를 b , 엔드밀의 헬릭스각을 β , 공구반경을 r 로 표기하였으며, 엔드밀 절삭날이 임의의 회전각 ϕ 만큼 회전할 때 절삭날

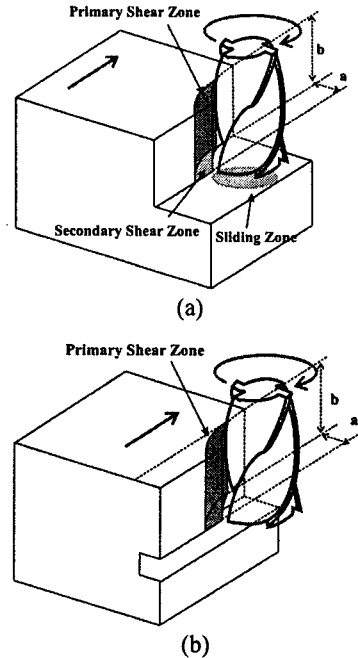


Fig. 1 Schematic diagram of down end-milling process

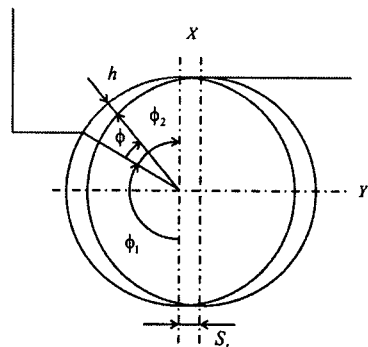


Fig. 2 Undeformed chip thickness, h in down end milling

의 범위와 각 범위에서 절삭에 참여하는 절삭날의 길이를 나타낸 것이다.

이때 기하학적인 관계로부터 위쪽 부분 절삭날이 절삭을 개시할 때의 각 δ 와 ϕ_2 및 ϕ_1 은 각각 식 (2), (3) 및 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta = \frac{b \tan \beta}{r} \quad (2)$$

$$\phi_2 = \cos^{-1}\left(\frac{r-a}{r}\right) \quad (3)$$

$$\phi_1 = \pi - \phi_2 \quad (4)$$

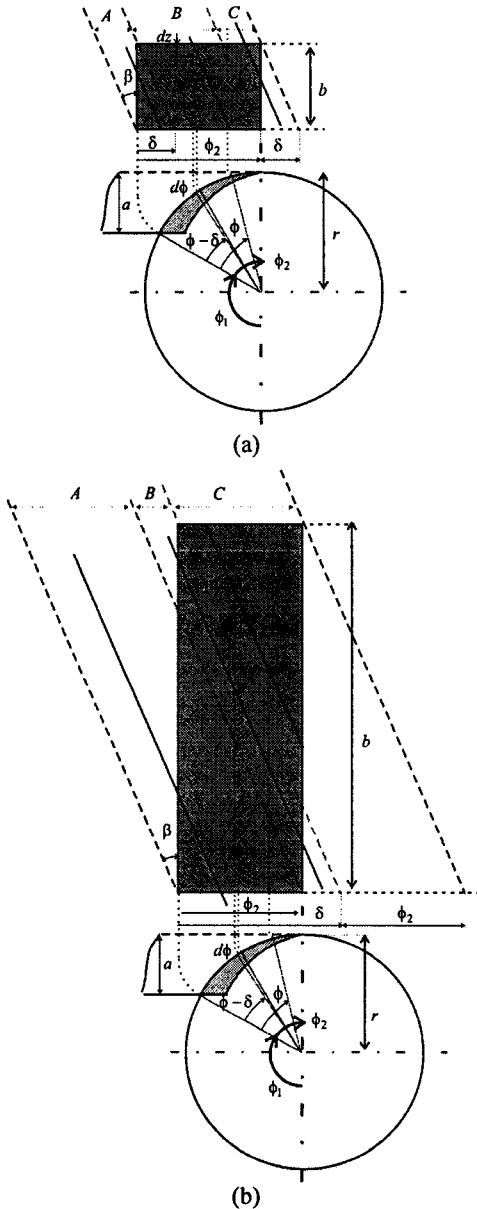


Fig. 3 Unfolded surface of cut with small axial depth of cut (a) and relative large one (b)

한편 Fig. 3(a)는 $\delta < \phi_2$ 인 경우로서 공구가 회전함에 따라 절삭날의 임의의 위치에 따른 회전각 ϕ 는 A 영역에서 $0 \leq \phi \leq \delta$, B 영역에서 $\delta \leq \phi \leq \phi_2$, C 영역에서 $\phi_2 \leq \phi \leq \phi_2 + \delta$ 의 범위를 가지며, 이때 각각의 영역에서 절삭에 참여하는 절삭날의 길이는 각각 A 영역에서는 0 에서 ϕ 만큼,

B 영역에서는 $\phi - \delta$ 에서 ϕ 만큼, C 영역에서는 $\phi - \delta$ 에서 ϕ_2 만큼 절삭에 참여하게 된다.

Fig. 3(b)는 $\delta > \phi_2$ 인 경우로서 공구가 회전함에 따라 절삭날의 임의의 위치에 따른 회전각 ϕ 는 A 영역에서 $0 \leq \phi \leq \phi_2$, B 영역에서 $\phi_2 \leq \phi \leq \delta$, C 영역에서 $\delta \leq \phi \leq \delta + \phi_2$ 의 범위를 가지며, 절삭에 참여하는 절삭날의 길이는 각각 A 영역에서는 0 에서 ϕ 만큼, B 영역에서는 0 에서 ϕ_2 만큼, C 영역에서는 $\phi - \delta$ 에서 ϕ_2 만큼 절삭에 참여하게 된다.

이때 Fig. 3(a)와 (b)를 구분하는 기준은 $\delta = \phi_2$ 로서 축방향 절삭깊이 b 에 대하여 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$b = \cos^{-1}\left(\frac{r-a}{r}\right) \frac{r}{\tan \beta} \quad (5)$$

Fig. 4 는 공구가 회전할 때 공구 동력계로부터 측정되는 x 방향, y 방향 절삭력 성분과 공구가 회전하며 절삭할 때 재료가 저항하는 힘인 접선(t)방향, 반경(r)방향 절삭력 성분을 함께 나타낸 것이다. 이때 공구 동력계의 x-y 좌표계와 공구의 r-t 좌표계에서 x-y 방향 절삭합력 R 과 r-t 방향 절삭합력 R' 는 크기는 같고 방향은 반대이다.

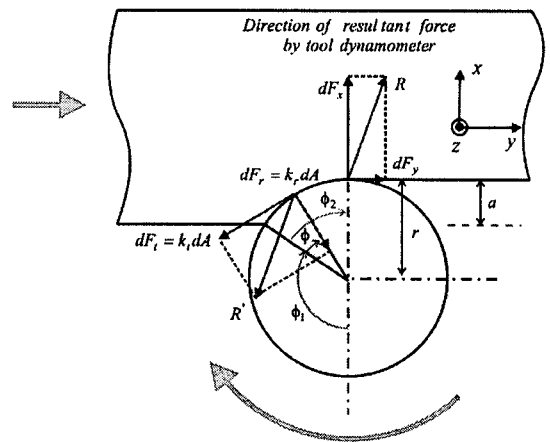


Fig. 4 Coordinate system for cutting force components in down end-milling

또한 반경방향 미소 절삭력 dF_r 과 접선방향 미소절삭력 dF_t 는 각각 미변형칩두께 h 와 미소

절삭길이 dz 의 좁은 단면적 dA 와 반경방향 비절삭저항 k_r , 접선방향 비절삭저항 k_t 의 곱으로 각각 식 (6) 및 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$dF_r = k_r dA = k_r h dz \quad (6)$$

$$dF_t = k_t dA = k_t h dz \quad (7)$$

이때 미소 절삭길이 dz 는 Fig. 3(a) 및 (b)에 나타낸 바와 같이 기하학적인 관계로부터 식 (8)과 같이 미소회전각 $d\phi$ 의 함수로 나타낼 수 있다.

$$dz = \frac{r}{\tan \beta} d\phi \quad (8)$$

또한 공구동력계의 $x-y$ 좌표계와 공구의 $r-t$ 좌표계 사이의 관계를 식 (6) 및 식 (7)을 이용하여 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} dF_x \\ dF_y \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos(\pi - (\phi_1 + \phi)) & -\sin(\pi - (\phi_1 + \phi)) \\ \sin(\pi - (\phi_1 + \phi)) & \cos(\pi - (\phi_1 + \phi)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dF_r \\ dF_t \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -\cos(\phi_1 + \phi) & \sin(\phi_1 + \phi) \\ -\sin(\phi_1 + \phi) & -\cos(\phi_1 + \phi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_r S_r \sin(\phi_1 + \phi) dz \\ k_t S_t \sin(\phi_1 + \phi) dz \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

따라서 Fig. 3(a)와 같이 $\delta < \phi_2$ 의 절삭 조건인 경우 식 (9)를 이용하여 각각의 영역에 따른 절삭력은 다음과 같이 나타낼 수 있다. 이때 각각의 영역에서의 절삭력 적분 구간은 절삭에 참여하는 절삭날의 길이이며, $F = S_r \frac{r}{\tan \beta}$ 이다.

$0 \leq \phi \leq \delta$ 인 경우

$$F_x = \int_0^{\delta} (-k_r \cos(\phi_1 + \phi) \sin(\phi_1 + \phi) + k_t \sin^2(\phi_1 + \phi)) F d\phi \quad (10)$$

$$F_y = \int_0^{\delta} (-k_r \sin^2(\phi_1 + \phi) - k_t \cos(\phi_1 + \phi) \sin(\phi_1 + \phi)) F d\phi \quad (11)$$

$\delta \leq \phi \leq \phi_2$ 인 경우

$$F_x = \int_{\delta}^{\phi_2} (-k_r \cos(\phi_1 + \phi) \sin(\phi_1 + \phi) + k_t \sin^2(\phi_1 + \phi)) F d\phi \quad (12)$$

$$F_y = \int_{\delta}^{\phi_2} (-k_r \sin^2(\phi_1 + \phi) - k_t \cos(\phi_1 + \phi) \sin(\phi_1 + \phi)) F d\phi \quad (13)$$

$\phi_2 \leq \phi \leq \phi_2 + \delta$ 인 경우

$$F_x = \int_{\phi_2}^{\phi_2 + \delta} (-k_r \cos(\phi_1 + \phi) \sin(\phi_1 + \phi) + k_t \sin^2(\phi_1 + \phi)) F d\phi \quad (14)$$

$$F_y = \int_{\phi_2}^{\phi_2 + \delta} (-k_r \sin^2(\phi_1 + \phi) - k_t \cos(\phi_1 + \phi) \sin(\phi_1 + \phi)) F d\phi \quad (15)$$

한편 Fig. 3(b)와 같이 $\delta > \phi_2$ 의 절삭조건인 경우 각각의 범위에 따른 절삭력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$0 \leq \phi \leq \phi_2$ 인 경우

$$F_x = \int_0^{\phi_2} (-k_r \cos(\phi_1 + \phi) \sin(\phi_1 + \phi) + k_t \sin^2(\phi_1 + \phi)) F d\phi \quad (16)$$

$$F_y = \int_0^{\phi_2} (-k_r \sin^2(\phi_1 + \phi) - k_t \cos(\phi_1 + \phi) \sin(\phi_1 + \phi)) F d\phi \quad (17)$$

$\phi_2 \leq \phi \leq \delta$ 인 경우

$$F_x = \int_{\phi_2}^{\delta} (-k_r \cos(\phi_1 + \phi) \sin(\phi_1 + \phi) + k_t \sin^2(\phi_1 + \phi)) F d\phi \quad (18)$$

$$F_y = \int_{\phi_2}^{\delta} (-k_r \sin^2(\phi_1 + \phi) - k_t \cos(\phi_1 + \phi) \sin(\phi_1 + \phi)) F d\phi \quad (19)$$

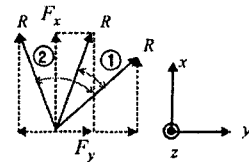
$\delta \leq \phi \leq \delta + \phi_2$ 인 경우

$$F_x = \int_{\delta}^{\delta + \phi_2} (-k_r \cos(\phi_1 + \phi) \sin(\phi_1 + \phi) + k_t \sin^2(\phi_1 + \phi)) F d\phi \quad (20)$$

$$F_y = \int_{\delta}^{\delta + \phi_2} (-k_r \sin^2(\phi_1 + \phi) - k_t \cos(\phi_1 + \phi) \sin(\phi_1 + \phi)) F d\phi \quad (21)$$

2.2 절삭력 성분의 부호 변동

Fig. 5 는 하향 엔드밀링시 공구동력계로부터 측정되는 절삭력 성분의 합력 R 과 측정 절삭력의 합력 R 을 회전하는 공구의 날끝에 투영하여 나타낸 것이다.



Direction of resultant force by tool dynamometer

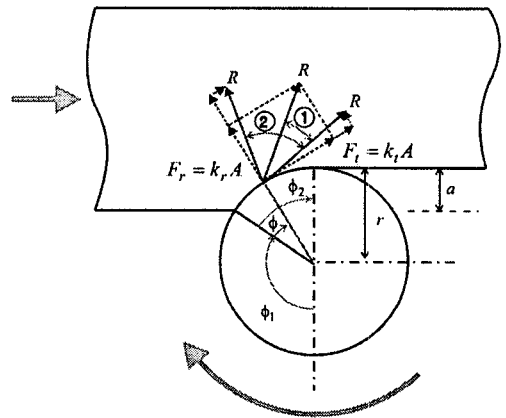


Fig. 5 Fluctuation of resultant cutting forces in down end-milling

그림에서 보는 바와 같이 공구동력계로 측정되는 절삭력 성분 중 F_y 방향의 절삭력 성분은 일반적으로 양수 또는 음수의 한 부호로 나타나나, 절삭조건에 따라 공구 1 회전 동안 양 및 음수 부호 변동이 나타날 수 있다. 이는 그림에서 보는

바와 같이 양수 부호만 나타나는 경우 절삭력 성분의 합력 방향은 ①의 변동각을 가지지만, 양수에서 음수 부호로 바뀌는 경우 ②의 변동각을 가지게 됨을 의미한다. 즉, $x-y$ 평면에서 공구동력계가 놓여진 x 축을 기준으로 ①인 경우 우측평면에서만 절삭력 성분의 합력 방향이 변동하나, ②인 경우 좌측평면에서 우측평면으로 넓게 변동하고 있다.

3. 절삭실험

본 연구에서는 SM45C를 피삭재로 하여 축방향 절삭깊이 b 는 7mm로 일정하게 고정한 후, 반경방향 절삭깊이 a 를 1mm에서 5mm까지 1mm 간격으로 변화시키면서 실험을 수행하였다.

Table 1은 절삭실험 조건을 나타낸 것으로, 이때 절삭력은 공구동력계(Kistler 9257B)를 사용하여 측정 후 분석하였다.

Table 1 Cutting Condition

Tool	HSS End-mill
Helix angle, β (°)	30
Number of tooth, z	2
Tool radius, r (mm)	5
Workpiece	SM45C
Radial depth of cut, a (mm)	1~5 (step: 1)
Axial depth of cut, b (mm)	7
Spindle speed, S (rpm)	1200
Feedrate, F (mm/min)	150
Feed per tooth, S_t (mm/tooth)	0.065
Cutting circumstance	Dry
Sampling rate for data acquisition	3000 Hz

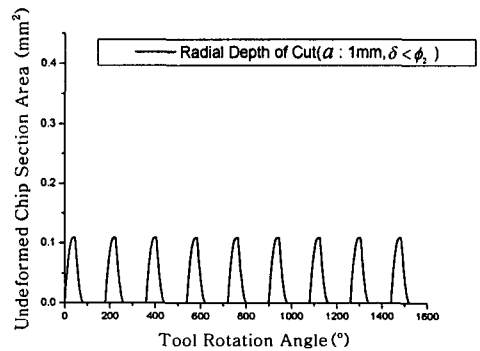
4. 실험결과 및 고찰

4.1 미변형칩단면적

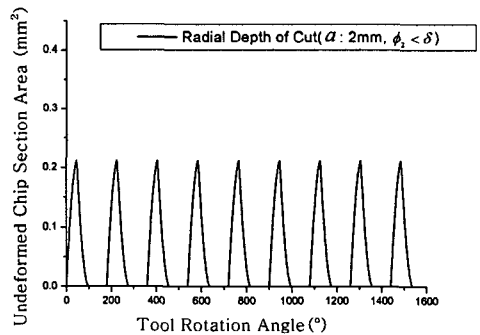
Fig. 6은 주어진 절삭조건에 의하여 미변형칩두께 h 와 미소절삭폭 dz 의 곱으로 계산되는 미변

형칩단면적을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 반경방향 절삭깊이 a 가 증가함에 따라 미변형칩단면적 역시 증가하고 있다.

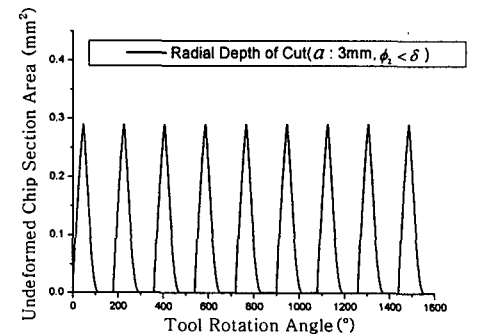
한편 축방향 절삭깊이가 b 가 7mm인 경우 반경방향 절삭깊이 a 가 1mm인 경우 위쪽 부분 절삭날이 절삭을 개시할 때의 각 δ 가 아래쪽 절삭날이 피삭재를 벗어날 때의 각 ϕ_2 보다 작은 $\delta < \phi_2$ 에 해당하며 반경방향 절삭깊이 a 가 2mm 이상이 되면 $\phi_2 < \delta$ 로 바뀌게 된다.



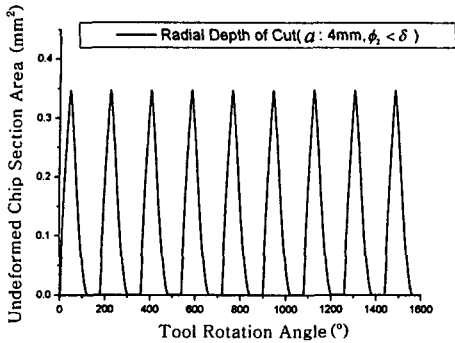
(a) $a : 1\text{mm}$



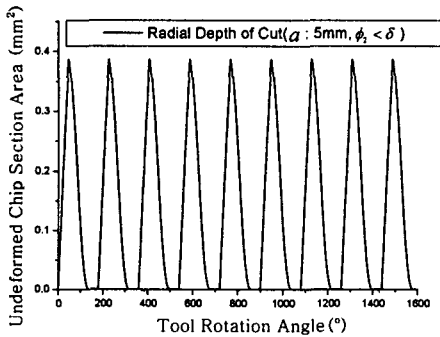
(b) $a : 2\text{mm}$



(c) $a : 3\text{mm}$



(d) $a : 4\text{mm}$



(e) $a : 5\text{mm}$

Fig. 6 Undeformed chip section area (mm^2)

4.2 비절삭 저항

Fig. 7 은 sampling rate 를 3000 H_z 로 하여 공구 동력계로부터 측정되는 절삭력 F_x 및 F_y 를 각 범위에 따른 절삭력 표현식에 대입하여 계산되는 반경방향 비절삭저항 k_r 및 접선방향 비절삭저항 k_t 의 각각의 순간적인 값들의 평균값을 반경방향 절삭깊이 a 에 대하여 나타낸 것이다.

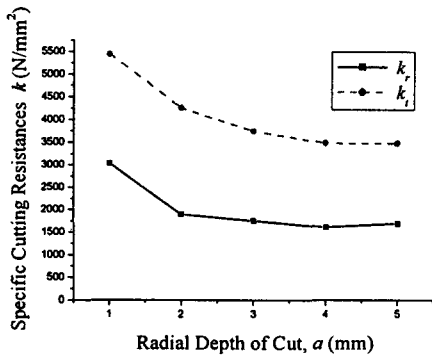


Fig. 7 Specific cutting resistance (N/mm^2)

그림에서 보는 바와 같이 반경방향절삭깊이 a 가 증가함에 따라 두 비절삭저항이 지수함수적으로 감소하는 경향을 나타내고 있으며 이는 치수효과에 기인한 것으로 판단된다. 이때 반경방향 비절삭저항 k_r 및 접선방향 비절삭저항 k_t 의 평균값은 각각 $1997.6 \text{ N}/\text{mm}^2$, $4067.7 \text{ N}/\text{mm}^2$ 을 나타내고 있다.

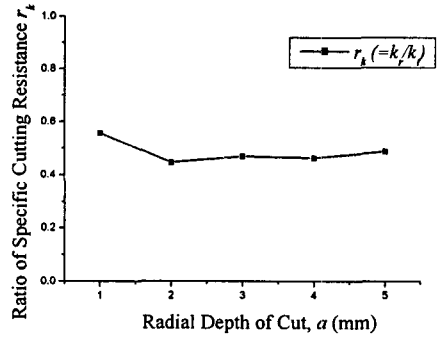
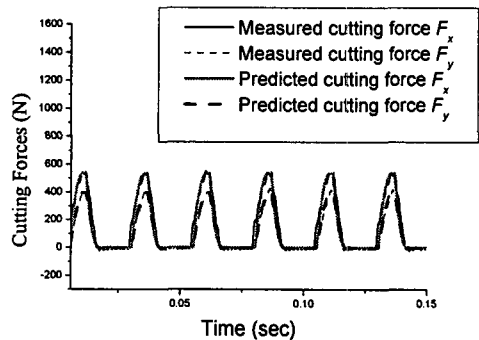
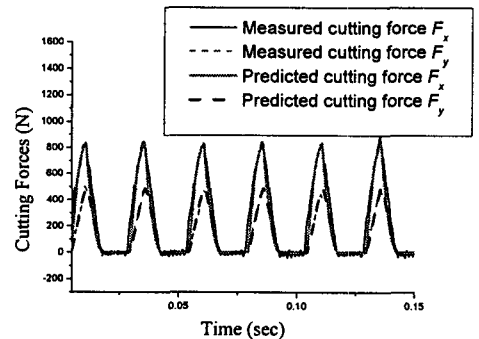


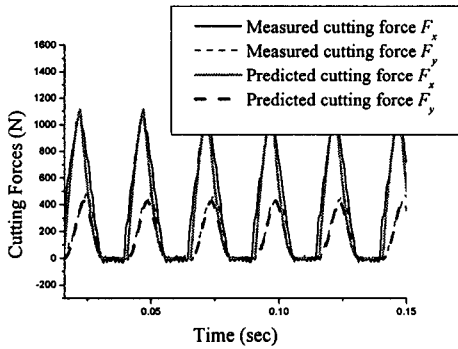
Fig. 8 The ratio of radial specific cutting resistance (k_r) to tangential specific cutting resistance (k_t)



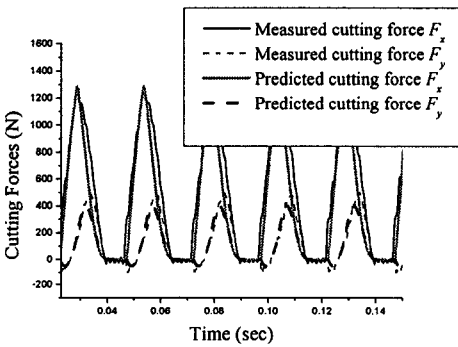
(a) $a : 1\text{mm}$



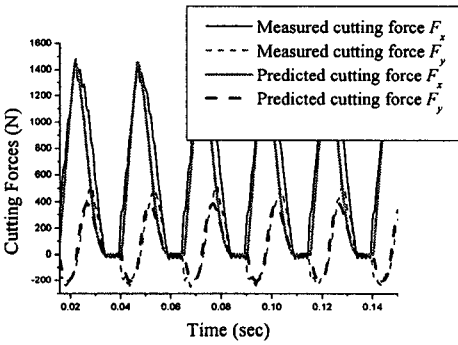
(b) $a : 2\text{mm}$



(c) $a : 3\text{mm}$



(d) $a : 4\text{mm}$



(e) $a : 5\text{mm}$

Fig. 9 Comparisons of Cutting forces between measured and predicted cutting forces

Fig. 8 은 반경방향 비절삭저항과 접선방향 비절삭저항의 비 r_k 를 나타낸 것이다. 일반적으로 0.3 으로 알려져 있으나, 본 논문에서는 대략 0.49 로 나타났다.

Fig. 9 는 결정된 반경방향 및 접선방향 비절삭저항의 타당성을 검증하기 위하여 절삭력 표현식에 대입하여 계산되는 예측 절삭력을 측정된 절삭

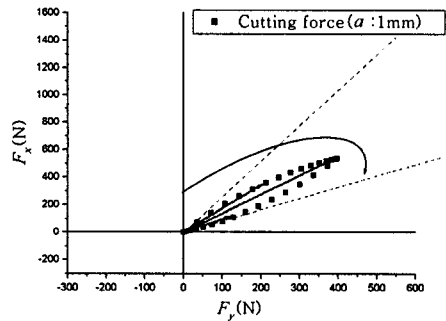
력과 함께 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 측정된 절삭력의 파형은 필터의 사용 없이도 매끄럽게 나타나고 있으며, 이는 2 날 엔드밀의 사용과 축방향 절삭깊이 b , 공구의 회전속도 S , 테이블 이송속도 F 가 적절하게 설정되고, Sampling rate 를 비교적 큰 값인 3kHz 로 하여 데이터를 획득하였기 때문인 것으로 생각된다.

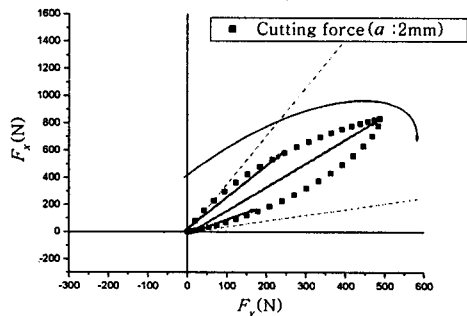
한편 측정된 절삭력과 예측된 절삭력이 비교적 잘 일치하고 있으며, 절삭력 F_y 는 반경방향 절삭깊이 a 가 4mm 이상인 경우부터 양수와 음수의 부호 변동을 나타내고 있다.

4.3 절삭력 부호의 변동

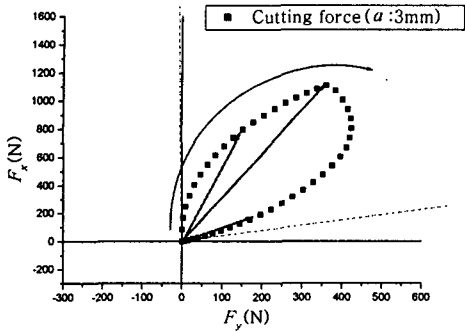
절삭력 성분들을 공구동력계가 놓여진 방향과 일치하도록 F_y 를 횡축으로, F_x 를 종축으로 하여 나타내면, 원점에서 각각의 점까지의 거리 및 방향은 각각 절삭력 성분의 합력의 크기 및 방향을 의미하게 된다. Fig. 10(a)~(e)는 예측 절삭력성분들인 F_y 를 횡축으로, F_x 를 종축으로 하여 나타낸 것이다.



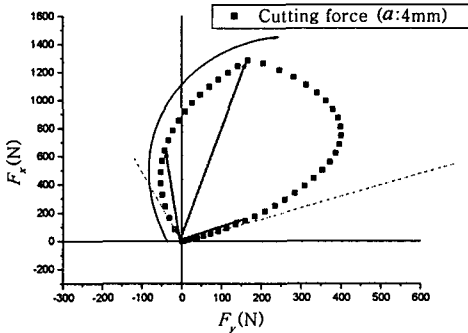
(a) $a : 1\text{mm}$



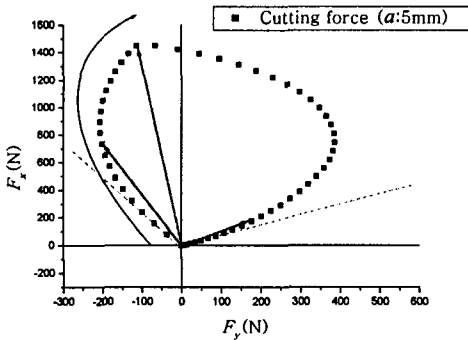
(b) $a : 2\text{mm}$



(c) a : 3mm



(d) a : 4mm



(e) a : 5mm

Fig. 10 Resultant cutting forces by F_x and F_y

그림에서 나타낸 바와 같이 공구가 1 회전하여 절삭하는 동안 절삭력의 합력은 0 에서부터 시계방향으로 점차 증가하여 최대가 되었다가 감소하여 다시 0 이 되며, 반경방향 절삭깊이 a 가 1~3mm 인 경우는 합력의 방향이 Fig. 5 의 ①과 같이 우측평면에서만 변동하나, 반경방향 절삭깊이가 4mm 이상인 경우부터 절삭력 성분의 합력 방향의 변동이 ②와 같이 좌측평면에서 우측평면으로 넓게 변동

하고 있다.

Table 2 는 Fig. 10 에 나타낸 최대 합력의 크기 및 변동각을 수치로 나타낸 것이다.

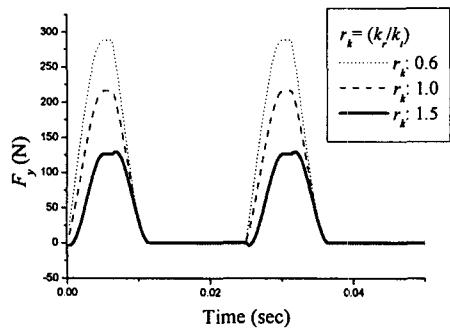
표에서 나타난 바와 같이 반경방향 절삭깊이가 증가함에 따라 합력의 크기 및 변동각의 크기가 증가하고 있으며, 특히 양음수 부호 변동의 원인은 합력의 방향이 좌측평면에서 우측평면으로 넓게 변동하면서 가해지는 반경방향 절삭력 성분 및 접선방향 절삭력 성분이 직교좌표계로 변환되면서 발생하는 것으로 판단된다.

Table 2 Maximum amplitude and fluctuation angle of resultant cutting force

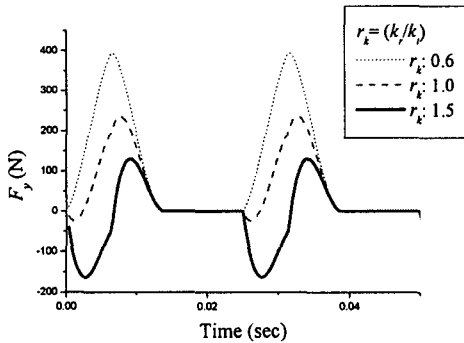
Radial depth of cut, a (mm)	Maximum amplitude (N)	Maximum angle ($^{\circ}$)
1	666.7	34.6
2	954.5	51.3
3	1166.6	63.7
4	1296.3	75.7
5	1455.0	105.8

Fig. 11 은 접선방향 비절삭저항 k_t 를 4067.7 N/mm^2 로 일정하게 하고 반경방향 비절삭저항 k_r 을 변화시켜 계산되는 예측 절삭력 F_y 를 나타낸 것이다.

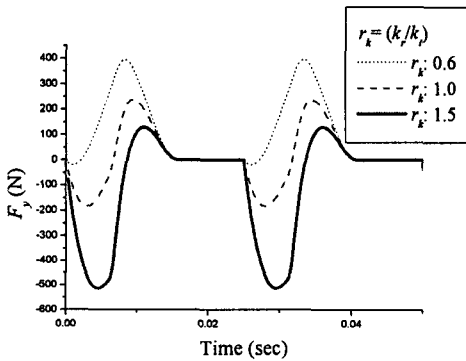
그림에서 보는 바와 같이 반경방향 절삭깊이 a 가 1mm 에서는 비절삭저항비 1.5, 2mm 인 경우 1.0, 3mm 인 경우 0.6 이상이 되면 절삭력 신호의 양음수 부호가 변동되어 나타날 수 있음을 알 수 있다. 이는 반경방향 비절삭저항 k_r 이 접선방향



(a) a : 1mm



(b) $a : 2\text{mm}$



$a : 3\text{mm}$

(c)

Fig. 11 Simulated cutting force F_y (N)

비절삭저항 k_t 에 근접하거나 크게 되면 부호 변동이 발생할 수 있음을 의미하며 비절삭저항비가 대략 1.0 인 경우는 난삭재 가공으로 보고된 바 있다.⁸

이상과 같이 반경방향의 절삭깊이 증가에 따른 절삭력의 방향변화 현상은 절삭공구에 주기적인 진동진동을 하게 되며, 이로 인하여 chatter진동이 발생하게 된다. 이러한 사실은 엔드밀링 가공에서 반경방향의 절삭깊이가 깊어질수록 chatter진동이 심하게 발생하는 원인임을 뜻한다.

5. 결론

본 논문에서는 절삭력 신호의 양음수의 부호 변동의 원인을 규명하였다. 이는 절삭력 성분의 합력방향의 변화 범위가 커지기 때문이며, 반경방향 절삭깊이가 증가하는 경우 발생함을 알 수 있었다.

또한 반경방향 비절삭저항이 접선방향 비절삭저항에 비하여 커지는 경우에도 발생할 수 있음을

시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

절삭력 성분의 합력 방향의 변화 범위가 넓어진다는 것은 공작물 가공시 공작물에 작용하는 힘의 방향 변화가 그만큼 넓어지게 된다는 것을 의미하며, 이는 난삭재 가공 또는 상대적으로 큰 반경방향 절삭깊이의 가공 조건에서 진동을 발생시킬 확률이 더 커질 것으로 사료된다. 향후 이에 대한 확인을 위하여 가속도계 센서를 사용한 진동 측정 실험을 계획하고 있다.

후 기

본 연구는 2005 학년도 영남대학교 학술연구조성비 지원(해외파견) 및 영남대학교 제 2 단계 BK21 사업의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Shaw, M. C., "Metal Cutting Principles," Oxford Univ. Press, pp. 428-450, 1984.
2. Martellotti, M. E., "An Analysis of the Milling Process," Trans. of ASME, Vol. 63, pp. 677-700, 1941.
3. Tlustý, J. and Macneil, P., "Dynamics of Cutting Forces in End Milling," Annals of CIRP, Vol. 24, No. 1, pp. 21-25, 1975.
4. Kline, W. A. and Devor, R. E., "The Effect of Runout on Cutting Geometry and Forces in End Milling," Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 23, pp. 123-140, 1983.
5. Kline, W. A., Devor, R. E. and Shareef, I. A., "The Prediction of Surface Accuracy in End Milling," Trans. ASME, Vol. 104, pp. 272-278, 1982.
6. Lee, Y. M., Song, T. S. and Sim, B. K., "The Shear and Friction Characteristics Analysis of End-Milling," J. of KSME, Vol. 25, No. 10, pp. 1520-1527, 2001.
7. Lee, Y. M., Lee, S. H. and Tae, W. I., "Prediction of Cutting Force in Down End Milling," Proc. of the KSPE, pp. 907-911, 2000.
8. Lee, Y. M., Lee, S. H., Tae, W. I., Kwon, O. J. and Choi, B. H., "Cutting Force Variation of Inconel 718 in Up and Down Endmilling with Different Helix Angles," J. of KSPE, Vol. 18, No. 7, pp. 143-148, 2001.