

등가경사절삭 시스템에 의한 Inconel 718 엔드밀링 공정의 전단 및 마찰특성 해석 I

-상향 엔드밀링-

이영문(경북대 기계공학부), 최원식(밀양대 기계공학과),
송태성*(경북대 대학원 기계공학과)

The Shear and Friction characteristics Analysis of Inconel 718 End-milling I using Equivalent Oblique Cutting System -Up endmilling-

Y. M. Lee(Mech. Eng. School. KNU), W. S. Choi(Mech. Eng. School. MNU),
T S Song(Mech. Eng. School. KNU)

ABSTRACT

In end milling process the undeformed chip thickness and the cutting force components vary periodically with phase change of the tool. In this study, up end milling process is transformed to the equivalent oblique cutting. The varying undeformed chip thickness and the cutting force components in end milling process are replaced with the equivalent average ones. Then it can be possible to analyze the chip-tool friction and shear process in the shear plane of the end milling process by the equivalent oblique cutting mode.

According to this analysis, when cutting Inconel 718, 61% of the total energy is consumed in the shear process and the balance is consumed in the friction process.

Key Words: Up end milling (상향 엔드밀링), Oblique cutting (경사절삭), Helix angle (헬릭스각), Specific shear energy (비전단에너지), Specific friction energy (비마찰에너지), Specific cutting energy (비절삭에너지)

1. 서론

엔드밀링은 2개 이상의 절삭날로 구성된 공구에 의해 이루어지는 단속절삭공정으로 주기적으로 미변형칩두께(undeformed chip thickness)가 변하며 경우에 따라 여러 개의 절삭날이 동시에 절삭작용을 하기 때문에 절삭공정에 대한 해석이 미변형칩두께가 일정한 연속절삭공정에 비해 매우 복잡하다.

밀링공정 해석에 대한 연구는 Martellotti⁽¹⁾가 상향 및 하향 밀링공정에서의 공구경로에 따른 미변형칩두께 변화에 대한 기하학적 관계를 정립한 이후, Tlustý와 Macneil⁽²⁾은 상향 엔드밀링 공정에서 공구의 형상과 절삭조건에 따라 변화하는 미변형칩두께 사이의 상관관계를 이용하여 절삭력을 비절삭저항과

미변형칩단면적의 곱으로 나타내는 절삭력 예측 모델을 제시하고, 실제 절삭력 측정실험을 통하여 제시된 모델의 타당성을 검토한 바 있다.

절삭과정은 칩 생성과정이며, 칩 생성은 전단역이라 불리우는 극히 한정된 영역에서 매우 좁은 간격을 두고 잇달아 일어나는 집중된 전단소성변형에 의해 이루어지고 생성된 칩은 공구경사면과 심한 마찰을 일으키면서 외부로 배출된다.⁽³⁾

따라서 절삭과정에 대한 해석은 전단역에서의 전단과정과 칩-공구 마찰과정에 대한 해석에 기초하고 있다.

최근까지 밀링공정에 대한 해석이 다각적으로 이루어지고 있으나, 아직 이의 전단특성과 칩-공구 마찰특성에 대한 해석은 이루어지지 않고 있다.

최근 이등¹⁴⁾은 단속절삭공정인 엔드밀링공정에 상당하는 등가의 경사절삭모형을 설정하고, SM45C에 대한 절삭실험을 통하여 엔드밀링의 전단 및 마찰특성 해석을 시도한 바 있다.

본 논문에서는 상기의 설정된 등가 경사절삭모형을 이용하여 난삭재로 알려진 Inconel 718의 상향 엔드밀링시 전단특성 및 칩-공구 마찰특성 해석을 수행하였다.

2. 등가 경사절삭모형

2.1 절삭 조건의 동일화

엔드밀링에 상당하는 등가의 경사절삭 모형을 설정하기 위해서는 엔드밀링과 경사절삭을 비교함으로써 엔드밀링의 가공조건을 경사절삭의 가공조건과 동일화시키는 과정이 필요하다.

Fig. 1(b)는 상향 엔드밀링[Fig. 1(a)]에서의 미변형칩을 평면으로 전개시켜 놓았을 경우의 절삭모형을 나타낸 것이며, Fig. 1(c)는 경사절삭모형을 나타내고 있다.

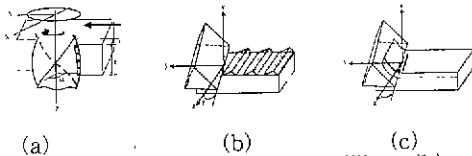


Fig. 1 Schematics of (a) end milling, (b) spread end milling and (c) oblique cutting models

경사절삭은 절삭날이 공구의 진행방향과 수직인 축 x 와 기울임각 (inclination angle), i 를 이루며 연속적으로 진행되는 절삭방식이다 Fig. 1(b)와 (c)를 비교해 보면 공구의 진행방향에 대해 전개된 엔드밀링모형에서도 날이 공구의 진행방향에 수직인 축 z 에 대해 헬릭스각 β 만큼 기울어져 있으며 이것은 경사절삭에 있어 기울임각 i 에 해당한다.

그러나 전개된 엔드밀링모형[Fig. 1(b)]에서는 한 날이 가공을 마친 후 다음 날이 가공을 시작하기 전까지 일정한 간격이 존재하므로 단속절삭이 이루어진다. 그러므로 엔드밀링을 경사절삭에 대응시키기 위해서는 일정한 절삭깊이를 갖는 연속절삭방식의 경사절삭으로 변환하는 것이 필요하다.

전 구간에 대한 평균 절삭깊이를 결정하기 위해 공작물 길이인 절삭길이 w 와 반경방향 절삭깊이 a 의 곱으로 주어지는 면적을, w 를 절삭하는 동안의 회전수와 절삭작용을 하는 엔드밀의 원호길이의 곱으로 표현되는 L 로 나누어 평균 절삭깊이 h_{av} 를 결정하였다. L 은 식(1)로부터 구할 수 있으며, h_{av} 는 식(2)로부터 구할 수 있다.

$$L = 2\pi r \frac{w}{S_t z} \quad (1)$$

$$h_{av} = \frac{aw}{L} \quad (2)$$

Fig. 2는 공구의 진행방향으로 전개된 미변형칩의 총 단면적과 등가인 면적을 평균 절삭깊이 h_{av} 와 총 전개길이 L 로 변환시킨 등가 경사절삭 모형을 나타낸 것이다. L 과 h_{av} 가 결정되면, 엔드밀링 공정에 상당하는 경사절삭으로의 변환이 가능하게 된다.

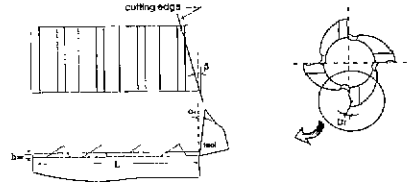


Fig. 2 Equivalent oblique cutting model

Table 1에는 엔드밀링과 경사절삭의 절삭입력조건을 나타내었다.

경사절삭 모델에서는 Table 1에 나타난 입력조건에 의해 칩-공구 마찰특성과 전단면상에서의 전단특성을 분리하여 해석할 수 있다.

이를 위해서는 주어진 엔드밀링 가공조건을 경사절삭의 가공조건들과 연관지어 생각할 필요가 있다. a 와 w 에 의해 결정된 공구의 반경방향 이송의 평균값 h_{av} 는 경사절삭의 절삭깊이 t 에 해당되며, 축방향 절삭깊이와 절삭속도, 헬릭스각은 각각 경사절삭에서의 절삭폭, 절삭속도 및 기울임각과 같은 의미를 가진다. 그리고 엔드밀 공구의 반경방향 경사각 α_r 은 경사절삭에 있어 속도경사각 α_v 에 해당하며, 경사절삭에 있어 공구의 고유 경사각인 수직경사각 α_n 과 속도경사각 α_v 사이에는 식(3)의 관계가 성립한다.¹⁵⁾

$$\tan \alpha_n = \cos i \tan \alpha_v \quad (3)$$

Table 1 Input conditions of cutting systems

| End milling | Oblique cutting |
|-------------------------------|-------------------------------|
| Radial depth of cut, a | Depth of cut, t |
| Axial depth of cut, b | Width of cut, b |
| Cutting length, w | |
| Cutting velocity, V | Cutting velocity, V |
| Radial rake angle, α_r | Normal rake angle, α_n |
| Helix angle, β | Inclination angle, i |
| Number of tooth, z | |
| Feed per tooth, S_t | |

2.2 절삭력의 결정

Fig. 3은 엔드밀링 절삭시 한 날이 작용할 때 측정되는 미소 절삭력 성분 dF_x , dF_y 및 dF_z 를 나타내

고 있다.

그러나 Fig 1(b)와 같이 미변형칩을 공구의 진행 방향에 대하여 전개하였을 경우 경사절삭 모델에 있어 주분력은 공구의 진행방향의 힘으로 칩선방향의 힘 dF_x 에 해당되며, 경사절삭 모델의 이송분력은 엔드밀링에 있어 반경방향의 힘 dF_z 에 해당된다. 또한 Fig 3에서의 dF_z 는 경사절삭 모델에서의 배분력에 해당된다

측정 가능한 미소 절삭력 성분 dF_x , dF_z 와 칩선 방향의 미소 절삭력 dF_t , 반경방향의 dF_r 사이에는 식 (4)의 관계가 성립하며, 칩선방향 및 반경방향의 미소 절삭력 성분 dF_x , dF_z 는 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} dF_x \\ dF_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos\phi & \sin\phi & 0 \\ -\sin\phi & -\cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dF_t \\ dF_r \\ dF_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} dF_x &= k_r dA = k_r h dz \\ dF_z &= k_t dA = k_t h dz \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 반경방향의 이송 h 의 결정을 위해 미변형 칩의 단면을 Fig. 4와 같이 실제 미변형의 칩의 면적과 동가인 삼각형으로 가정하였다

반경방향 이송 h 는 Fig. 4(a)에 나타난 것과 같이 날이 기준 위치로부터 ϕ_1 사이의 임의의 각도 ϕ 일 때는 식(6)으로, Fig 4(b)에 나타난 것처럼 ϕ_1 에서 ϕ_2 사이의 임의의 각도 ϕ 일 때는 식(7)과 같은 비례식이 성립한다.

미소절삭폭 dz 는 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

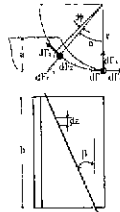


Fig 3 Coordinate system for up end milling and cutting force components

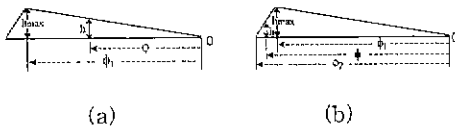


Fig. 4 Spread undeformed chip cross section

$$h = \frac{h_{max}}{\phi_1} \phi \quad (6)$$

$$h = \frac{h_{max} (\phi_2 - \phi)}{(\phi_2 - \phi_1)} \quad (7)$$

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

Fig. 5는 임의의 각 ϕ 에서 날의 위치에 따른 직용날의 길이를 $[0, \phi_1]$, $[\phi_1, \phi_2]$, $[\phi_2, \phi_3]$, $[\phi_3, \phi_4]$ 및 $[\phi_4, \phi_5]$ 의 다섯 구간으로 나타낸 것이다.

ϕ_3 는 식(9)로 표시할 수 있으며, $\phi_4 = \phi_3 + \phi_1$, $\phi_5 = \phi_3 + \phi_2$ 의 관계가 성립한다

$$\phi_3 = \frac{b \tan\beta}{r} \quad (9)$$

식(6), (7), (8)을 식(5)에 대입한 후 이를 다시 식 (4)에 대입하면 날의 위치에 따른 절삭력을 다음과 같이 표시할 수 있다.

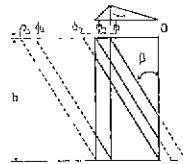


Fig. 5 Cutting edge length depends on cutting edge position

$[0, \phi_1]$ 구간

$$F_x = -k_r \int_0^{\phi} \cos\phi \frac{h_{max}\phi}{\phi_1} \frac{r}{\tan\beta} d\phi + k_t \int_0^{\phi} \sin\phi \frac{h_{max}\phi}{\phi_1} \frac{r}{\tan\beta} d\phi$$

$$F_z = -k_r \int_0^{\phi} \sin\phi \frac{h_{max}\phi}{\phi_1} \frac{r}{\tan\beta} d\phi - k_t \int_0^{\phi} \cos\phi \frac{h_{max}\phi}{\phi_1} \frac{r}{\tan\beta} d\phi$$

으로 나타낼 수 있으며 다른 구간들 역시 같은 방법으로 표현할 수 있다

공구 동력계로부터 측정된 절삭력성분들을 위의 식들에 대입함으로써 비절삭저항 k_r , k_t 를 결정할 수가 있으며, 이렇게 결정된 비절삭저항을 식(10)에 대입함으로써 칩선방향과 반경방향의 절삭력을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_x &= k_r A \\ F_z &= k_t A \end{aligned} \quad (10)$$

3. 절삭 실험

절삭실험에 사용하기 위하여 지름 8mm, 날수 4, 헬릭스각 30°, 40° 및 50°인 초경엔드밀 공구를 제작하였으며 공구의 성능을 개선하기 위하여 TiAlN 코팅을 하였다. 피삭재로는 난삭재인 Inconel 718을 최대회전수 6000rpm, 주축 동력이 20마력인 Yamage Techno사의 머시닝 센터를 사용하여 가공하였다. 절삭실험 조건은 Table 2에 나타낸 바와 같다.

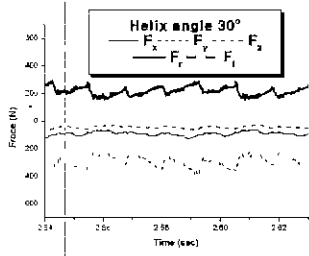
Table 2 Cutting conditions

| | |
|-----------------------------------|------------|
| Radial depth of cut, a (mm) | 1.0 |
| Axial depth of cut, b (mm) | 12 |
| Cutting velocity, V (m/min) | 30 |
| Radial rake angle, α_r (°) | 8 |
| Helix angle, β (°) | 30, 40, 50 |
| Number of tooth, z | 4 |
| Feed per tooth, S_t (mm) | 0.06 |

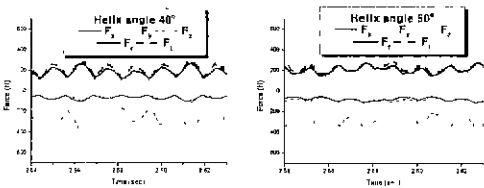
4. 실험결과 및 고찰

4.1 절삭력

공구동력계로부터 얻어진 절삭력성분 및 변환된 절삭력 성분은 Fig 6과 같다.



(a) H.A. 30°



(b) H.A. 40°

(c) H.A. 50°

Fig 6 Measured cutting forces (N) and transformed cutting forces (N)

4.2 칩두께

생성된 칩의 단면에서 최대 칩두께 t_{c-max} 를 측정할 수 있으며, Table 6에는 측정된 최대 칩두께와 평균 칩두께, 최대 미변형칩두께 및 평균 미변형칩두께를 나타내었다.

Table 6 Chip thicknesses and undeformed chip thicknesses

| | 30° | 40° | 50° |
|-------------|--------|--------|--------|
| t_{c-max} | 0.132 | 0.105 | 0.087 |
| t_{c-av} | 0.032 | 0.025 | 0.021 |
| h_{max} | 0.0394 | 0.0394 | 0.0394 |
| h_{av} | 0.0095 | 0.0095 | 0.0095 |

4.3 해석결과

Table 7에는 측정된 절삭력성분을 좌표변환하여 얻어지는 접선방향 및 반경방향 절삭력성분과 축방향 절삭력성분을 경사절삭모델⁽⁵⁾에 대입하여 얻은

해석결과를 나타내었다

Table 7 Output values

| | 30° | 40° | 50° |
|--|--------|--------|--------|
| Friction force, F_f (N) | 253.41 | 215.93 | 254.68 |
| Normal force, F_n (N) | 185.00 | 177.16 | 194.58 |
| Coefficient of friction, μ | 1.33 | 1.16 | 1.20 |
| Shear force, F_s (N) | 157.86 | 143.81 | 155.71 |
| Shear force to the shear plane, F_{s0} (N) | 271.83 | 239.43 | 280.13 |
| Shear strain γ | 3.70 | 3.14 | 2.91 |
| Shear stress, τ (Mpa) | 348.9 | 350.1 | 358.0 |
| Normal stress, σ (Mpa) | 603.5 | 589.3 | 671.0 |
| Specific friction energy, u_f (Mpa) | 641.9 | 686.6 | 920.8 |
| Specific shear energy, u_s (Mpa) | 1290.9 | 1098.0 | 1042.9 |
| Specific cutting energy, u_c (Mpa) | 1932.8 | 1784.6 | 1972.6 |
| u_f/u_c | 0.33 | 0.38 | 0.47 |
| u_s/u_c | 0.67 | 0.62 | 0.53 |

Shaw⁽⁵⁾는 경사절삭 실험결과와 고찰을 통해 기울임각의 증가에 따라 비절삭에너지가 감소하게 됨을 제시하였다. 표에서 보는 바와 같이 Inconel 718인 경우, 기울임각에 해당하는 헬릭스각이 30°에서 40°로 증가함에 따라 비절삭에너지가 감소하였지만, 헬릭스각이 40°에서 50°로 증가함에 따라 비절삭에너지가 다시 증가하는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 논문에서는 상향 엔드밀링 공정에 상당하는 등가의 경사절삭 모델을 설정하였다. 이를 통해 전단특성 및 칩-공구 마찰특성을 분리하여 해석할 수 있었다.

난삭재인 Inconel 718을 헬릭스각이 30°, 40° 및 50°인 날수 4개의 초경엔드밀 공구를 제작하여 실험한 결과 평균적으로 절삭에너지 중 전단과정에서 약 61%가 소모되었으며, 칩-공구 마찰과정에서는 약 39%가 소모된 것으로 나타났으며 비전단에너지 u_c 는 헬릭스각이 커짐에 따라 감소하고 비마찰에너지 u_f 는 증가하여, 비전단에너지와 비마찰에너지의 합인 비절삭에너지 u_c 는 30°에서 40°로 증가함에 따라 감소하였다가 헬릭스각 50°에서 다시 증가하는 경향을 나타내었다.

참고문헌

- Martellotti, M.E., "An Analysis of the Milling Process," Trans. of ASME, Vol. 63, pp. 677-700, 1941
- Thusty, J and Macneil, P., "Dynamics of Cutting Forces in End Milling," Annals of CIRP, Vol. 24, pp. 21-25, 1975.
- Zorev, N.N., "Interrelationship Between Shear Processes Occurring Along Tool Face and on Shear Plane in Metal Cutting," Pro. Inter Res. Prod. Conf, Carnegie Inst. of Tech., pp. 42-49, 1963.
- 이영문, 송태성, 심보경, "엔드밀링의 전단특성 및 마찰특성해석," 대한기계학회 추계학술대회논문집 A, pp 724-729, 2000.
- Shaw, M.C. "Metal Cutting Principles," Clarendon Press, oxford, pp. 428-438, 1984.