

정면밀링에서 공구경사각을 고려한 비절삭저항 예측

류시형*, 주종남**

Prediction of Specific Cutting Pressure in Face Milling Considering Tool Rake Angles

S. H. Ryu*, C. N. Chu**

ABSTRACT

In this study, investigated are the effects of tool rake angles and the change of cutting conditions on the specific cutting pressure in face milling. The cutting force in face milling is predicted from the double cutting edge model in 3-dimensional cutting. Conventional specific cutting pressure model is modified by considering the variation of tool rake angles. Effectiveness of the modified cutting force model is verified by the experiments using special face milling cutters with different cutter pockets and various rake angles. From the comparison of the presented model and the specific cutting pressure, it is shown that the axial force can be predicted by the tangential force, radial force and geometric conditions. Also, the relationship between specific cutting pressure and cutting conditions including feedrate, cutting velocity and depth of cut is studied.

Key Words : Face Milling(정면밀링), 3-Dimensional Cutting(삼차원절삭), Cutting Force(절삭력), Tool Rake Angle(공구경사각), Specific Cutting Pressure(비절삭저항)

기 호 설 명

i : 절삭날경사각	α_n : 수직경사각	f_t : 날당이송	α_e : 유효경사각
α_b : 상면경사각	α_s : 측경사각	β : 마찰각	τ_e : 전단강도
C_s : 옆날각	C_e : 앞날각	ϕ_e : 유효전단각	t : 미변형칩두께
η_c : 칩유출각	ϕ : 공구회전각	d : 절삭깊이	K, K_1, K_2 : 비절삭저항
θ : 공구위치각	$\gamma_r, \gamma_a, \gamma_l$: 공구경사각	A_p, A_2 : 전단면적	N : 절삭날수

* 서울대 대학원 기계설계학과
 ** 서울대 기계설계학과

1. 서론

공작기계의 주축을 비롯한 부품 설계, 절삭공구의 효율적인 설계, 공작기계의 이상상태 진단, 적응 제어 등에 있어서 가장 기본적으로 예측되어야 할 요소가 가공 부하로 작용하는 절삭력이다. 정면밀링은 다른 절삭 공정에 비해 높은 금속 제거율을 얻을 수 있으며 표면 거칠기도 비교적 우수하여 고효율을 요하는 자동차, 항공기, 선박 등 대부분의 중공업 분야에 널리 이용되고 있다.

지금까지 정면밀링 절삭력해석의 주류는 크게 두 가지가 있는데 하나는 선삭에서의 삼차원 절삭모델을 정면밀링에 그대로 적용시키는 것이고, 다른 하나는 미변형칩단면적과 주절삭분력이 비례한다고 보고 비절삭저항을 구해 절삭력을 예측하는 것이다. 전단응력 이론은 절삭속도 방향과 칩유출속도 방향이 이루는 면에서 이차원 절삭이 이루어진다는 가정에서 시작하는 것과 절삭날에 수직한 평면에서 이차원 절삭이 일어난다고 보는 두 가지 견해가 있다. Kirk⁽¹⁾는 전자의 이론을 적용하여 삼차원 절삭력을 예측하였는데 이 때 알아야 되는 요소로는 칩유출각, 마찰각, 전단각, 전단응력등이 있다. 여기서 전단응력은 재료 상수로 보아도 무방하고, 칩유출각은 경사각과 같다는 칩유동법칙⁽²⁾을 주로 사용한다. Usui⁽³⁾는 부절삭날의 영향을 고려하여 전단면을 구하고, 칩유동법칙 대신 에너지법을 사용하여 절삭에너지지를 최소화하는 방향으로 칩이 흐른다고 가정하여 삼차원 절삭을 해석하였다. Oxley⁽⁴⁾는 이차원 절삭의 해석에 있어서 공구면과 칩의 접촉부에서 미지의 마찰각대신 칩재료의 전단유동응력으로 대체하였고 이 때의 전단유동응력은 변형률과 절삭 속도에 따른 온도의 함수로 표현됨을 보였다. 그리고 Lin⁽⁵⁾등이 이를 삼차원 절삭력 해석에 이용하였다. 정면밀링 절삭력해석의 또 하나의 방법은 비절삭저항을 이용하는 것이다. 이 방법은 절삭단면적과 절삭력간의 상관관계를 비절삭저항으로 나타내어 간단한 실험을 통하여 이 계수를 구함으로써 절삭력을 실용적으로 예측하는 방법이다.⁽⁶⁾

정면밀링의 절삭성능에 영향을 주는 가장 중요한 요소 가운데 하나가 커터의 형상에 의해 결정되는 세 방향의 공구경사각이다. 이들을 각각 축방향경사각, 반경방향경사각, 리이드각이라 한다. 그 밖에 여러가지 공구여유각들이 존재하나 이들은 절삭력에 미치는 영향이 미소하다고 볼 수 있다.⁽⁶⁾ 지금까지의 연구들은 정면밀링의 절삭력 예측에 사용되는 비절삭저항을 구함에 있어서, 공구경사각이 고정된 커터로 절삭실험을 행하여 비절삭저항을 구

했기 때문에 공구경사각이 달라질 경우에 절삭력의 예측에 많은 오차가 발생한다. 따라서 공구경사각에 따른 비절삭저항의 변화를 알아보는 것이 필요하다. 본 논문에서는 선삭의 절삭력 예측에 사용되는 전단이론을 정면밀링에 적용하여 공구경사각이 절삭력의 크기와 방향에 미치는 영향을 예측하고, 커터 포켓의 형상을 변화시켜 절삭날마다 경사각이 다르게 설계된 특수 밀링커터를 제작하여 실험을 수행하고 예측값과 비교하여, 공구경사각 및 절삭조건을 고려한 정면밀링 절삭력 모델을 제시하고 비절삭저항의 변화에 대해서 고찰하였다.

2. 삼차원 절삭이론

2.1 선삭과 정면밀링에서의 공구각 비교

Fig.1은 선삭공구에서의 공구각들을 나타내고, Fig.2는 정면밀링 커터의 주요 공구경사각들을 나타낸다.

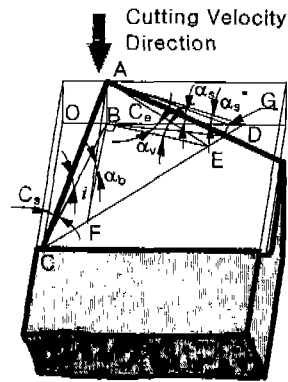


Fig.1 Turning Tool

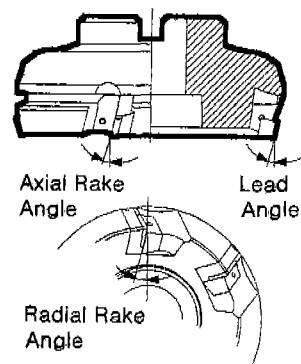


Fig.2 Face Milling Cutter

Fig.1 에서 선삭에서의 절삭날경사각(i), 속도경사각(α_v)을 선삭에서의 주요각들인 축경사각($\alpha_s = \angle AGB$), 상면경사각($\alpha_b = \angle AFB$), 옆날각($C_s = \angle OCB$)으로 나타내보자.

먼저 선삭에서의 경사각에 대해서 살펴보면 Fig.1 에서 $\triangle ODC$ 와 $\triangle BDF$ 가 닮았다는 조건으로부터,⁽⁷⁾

$$\tan i = \frac{AB}{BC} = \frac{AB}{BC} \left(\frac{OC}{BF} - \frac{OB}{BD} \right)$$

위에 주어진 각들로 나타내보면,

$$\tan \alpha_b = \frac{AB}{BF}, \tan C_s = \frac{OC}{BC}, \tan \alpha_s^* = \frac{AB}{BD}, \sin C_s = \frac{OB}{BC}$$

이므로,

$$\tan i = \tan \alpha_b \cdot \cos C_s - \tan \alpha_s^* \cdot \sin C_s \quad (1)$$

그리고, 위의 그림으로부터 아래의 식들이 유도된다.⁽⁷⁾

$$\begin{aligned} \tan \alpha_v &= \tan \alpha_s^* \cdot \cos C_s + \tan \alpha_b \cdot \sin C_s \\ \tan \alpha_n &= \tan \alpha_v \cdot \cos i \\ \tan \alpha_s^* &= \tan \alpha_s - \tan C_e \cdot \sin \alpha_b \end{aligned} \quad (2)$$

지금까지 살펴 본 선삭에서의 공구각과 정면밀링의 주요각 사이에는 다음과 같은 상사성이 성립한다. 즉, 선삭에서의 축경사각, 상면경사각, 옆날각은 각각 정면밀링에서의 반경방향경사각 (γ_r), 축방향경사각 (γ_a), 리이드각 (γ_l)에 해당된다. 따라서 정면밀링의 경사각으로부터 선삭에서의 절삭날경사각 (i), 수직경사각 (α_n)을 구해서, 선삭에서의 절삭력 모델을 정면밀링에 확장 적용하고 이를 통해 정면밀링에서의 경사각들이 비절삭저항에 미치는 영향을 고찰한다.

2.2 정면밀링의 절삭모델

절삭가공에 있어서 절삭속도 방향과 주절삭날이 수직을 이루지 않는 경우를 모두 삼차원 절삭이라 정의한다. 삼차원 절삭의 대표적인 절삭 모델에는 외 날 모델^(8,9)과 두 날 모델⁽¹⁰⁾이 있다. 두 방법 모두 삼차원 절삭을 해석함에 있어서 절삭속도 방향 벡터와 칩유출속도 방향 벡터에 의해 결정되는 평면에서는 이차원 절삭이 이루어진다고

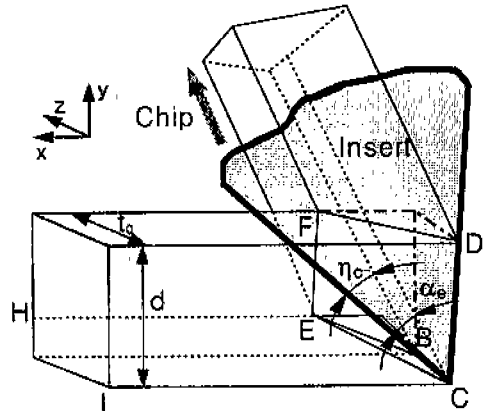


Fig.3 Oblique Cutting Model

보고, 이차원 절삭의 축적을 통해 삼차원 절삭을 해석한다. 날 당 이송량이 작을 경우에는 이차전단면에 일치한 단면에 비해 상대적으로 미소하므로 두 모델이 거의 일치한다고 볼 수 있지만 이송량이 비교적 많을 경우에는 후자의 모델이 더 실제 절삭과정을 잘 나타낸다고 할 수 있다. 삼차원 절삭에 있어서 유효경사각은 절삭기하로부터 다음과 같이 얻을 수 있다.⁽¹⁰⁾

$$\alpha_e = \sin^{-1}(\sin \alpha_n \cos i \cos \eta_c + \sin \eta_c \sin i) \quad (3)$$

여기서 η_c 는 공구면에서 주절삭날에 수직인 선과 칩유출방향 사이의 각으로 정의되는 칩유출각이다. Fig.1의 절삭기하를 Fig.3의 정면밀링에 그대로 적용하고, Fig.3에서의 C점을 원점, 절삭속도의 반대방향을 x축, 절삭깊이의 반대방향을 y축으로 하고 z방향은 오른손 법칙을 따라 설정하면 B, D, E점의 좌표는

$$\begin{aligned} B &= (-t_0 \tan \alpha_n, 0, t_0) \\ D &= (-d \tan i, d, 0) \end{aligned} \quad (4)$$

$$E = \left(\frac{t_0 \cos \alpha_e}{\cos \alpha_n \cos \eta_c \tan \phi_e}, \frac{t_0 \sqrt{\cos^2 \alpha_e - \cos^2 \alpha_n \cos^2 \eta_c}}{\cos \alpha_n \cos \eta_c}, t_0 \right)$$

벡터의 외적으로 삼각형 전단면 $A_1(\triangle BCE)$ 의 넓이와 사다리꼴 전단면 $A_2(\square CDFE)$ 의 넓이를 구하면

$$A_1 = \frac{|\vec{CB} \times \vec{CE}|}{2}, A_2 = \frac{|\vec{EF}| + |\vec{CD}|}{2} \cdot \frac{|\vec{CD} \times \vec{CE}|}{|\vec{CD}|} \quad (5)$$

이차원 절삭에서의 공구면의 마찰력을 삼차원 절삭에 확장 적용하면 마찰력은 식(6)과 같고, 전단력과 마찰력으로부터 주절삭분력은 식(7)과 같이 구해진다.

$$F_t = \frac{\tau_s \sin \beta \cos \alpha_e}{\cos(\phi_e + \beta - \alpha_e) \sin \phi_e \cos i \cos \alpha_n} dt_0 \quad (6)$$

$$F_H = \frac{\tau_s \cos \alpha_e}{\cos(\phi_e - \alpha_e)} \left\{ (A_1 + A_2) + \frac{dt_0 \sin \beta}{\cos(\phi_e + \beta - \alpha_e) \cos i \cos \alpha_n} \right\} \quad (7)$$

이 식에는 미지의 4개의 값들이 포함되어 있는데 전단 응력, 마찰각, 유효전단각 그리고 칩유출각들이 이에 해당한다. 위에서 얻어진 주절삭분력 값은 공구면에서의 마찰력(F_t)과 수직분력(N_t)으로 나눌 수 있는. 공구면에서의 합력의 주분력 성분과도 같아야 하므로 아래의 식이 성립한다.

$$(R_t)_H = N_t / \sqrt{\sec^2 i + \tan^2 \alpha_n} + F_t \sin \alpha_e = F_H$$

공구면에 수직한 분력은 이 식에서 결정되고 이송분력(F_f)과 배분력(F_p)은 수직분력과 마찰력으로부터 구할 수 있다.

$$F_f = -N_t \tan \alpha_n / \sqrt{\sec^2 i + \tan^2 \alpha_n} + F_t f_0 \cos \alpha_e / |CE| \sin \phi_e \quad (8)$$

$$F_p = -N_t \tan i / \sqrt{\sec^2 i + \tan^2 \alpha_n} + F_t \cos \alpha_e \sqrt{|CE|^2 \sin^2 \phi_e - t_0^2} / |CE| \sin \phi_e$$

2.3 비절삭저항의 고찰

정면밀링에서 미변형칩단면적에 대한 접선력, 반경력, 축력의 비를 각각 K_r, K_a, K_s 로 정의하면 위에 전개한 식에 의해서,

$$K_t = \left[\frac{\tau_s \cos \alpha_e}{\cos(\phi_e - \alpha_e)} \left\{ \frac{A_1 + A_2}{dt_0} + \frac{\sin \beta}{\cos(\phi_e + \beta - \alpha_e) \cos \alpha_n \cos i} \right\} \right]$$

$$K_r = -K_t \frac{\tan \alpha_n}{\cos i} + \frac{\tau_s \sin \beta \cos \alpha_e}{\cos(\phi_e + \beta - \alpha_e) \sin \phi_e} \left\{ \frac{\sin \alpha_n \sin \alpha_e}{\cos^2 i \cos^2 \alpha_n} + 1 \right\}$$

$$K_a = -K_t \tan i + \frac{\tau_s \sin \beta \cos \alpha_e}{2 \cos(\phi_e + \beta - \alpha_e) \sin \phi_e \cos i \cos \alpha_n} \cdot \{2 \tan i \sin \alpha_e + \sin 2i(1 - \sin \alpha_n)\} \quad (9)$$

미변형칩단면적은 리이드각 만큼 회전해 있으므로 정의된 방향으로의 비절삭저항은

$$\begin{aligned} K_r &= K_r' \cos Cs + K_a' \sin Cs \\ K_a &= K_r' \sin Cs - K_a' \cos Cs \end{aligned} \quad (10)$$

전단면적과 주절삭분력을 엄밀히 살펴보면 비절삭저항이 미변형칩두께 뿐 만 아니라 칩두께와 칩너비의 비에 관계되는 함수임을 알 수 있다.

$$\frac{\tau_s \sin \beta \cos \alpha_e}{\cos(\phi_e + \beta - \alpha_e) \sin \phi_e} = T \quad (11)$$

우리가 모르는 변수들이 들어있는 위 식의 값을 하나의 변수(T)로 치환하면, 축방향의 비절삭저항은 접선, 반경 방향의 비절삭저항과 공구형상각들로 표현되고 있음을 볼 수 있다. 이 식에는 정면밀링의 세 가지 주요 공구경사각이 포함되어 있어서 이들이 비절삭저항에 미치는 영향을 고찰할 수가 있다.

3. 정면밀링의 절삭력

3.1 정면밀링의 절삭기구

정면밀링 가공에 있어서 절삭날의 절삭경로는 회전과 이송의 동시 운동에 의해 사이클로이드 곡선을 그리지만, 일반적으로 이송율이 커터의 반경에 비해 매우 작으므로 원호로 근사할 수 있다.^(11,12) 따라서 순간 칩 두께(t)는 Fig.4 를 참조하면 공작물의 임의 절삭 위치에서 다음과 같다. 여기에서 ϕ 는 공구회전각을, f_t 는 날 당 이송량을, 그리고 R 은 커터의 반경을 나타낸다.

$$t(i, \phi) = R + f_t \sin \theta_i - \sqrt{R^2 - f_t^2 \cos^2 \theta_i} \approx f_t \sin \theta_i$$

Fig.4 에서 좌표 설정은 커터중심을 원점으로 하고 이송 방향을 x축, 절삭 표면에 수직하고 위 쪽을 향하는 방향을 z축, y축은 오른손 법칙을 따라 선정한다. 이 좌표계에서 축방향 힘(F_A)은 z방향과 일치하고 x축, y축 힘은 접선방향 힘(F_r)과 반경방향 힘(F_R)을 변환하여 얻는다.

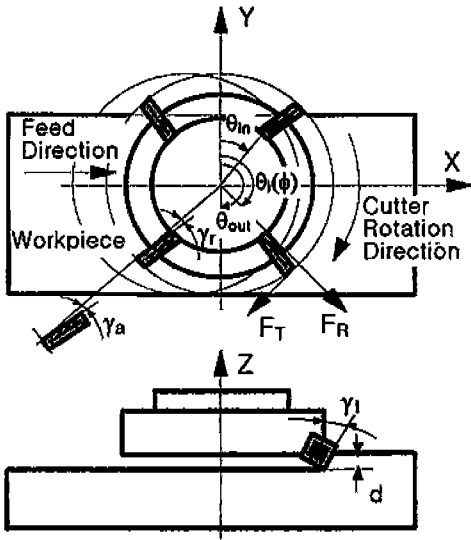


Fig. 4 Cutting Mechanism of Face Milling

정면밀링에서는 보통 여러 개의 절삭날이 동시에 절삭하므로 순간 절삭력을 얻기 위해서는 절삭중인 각 날에 작용하는 절삭력들을 더해야 한다.

3.2 비절삭저항의 결정

정면밀링 공정에서 칩두께는 절삭경로를 따라 계속 변화하기 때문에 일반적으로 칩두께의 함수로 알려진 비절삭저항 값은 일정하지 않지만 순간 절삭력을 예측하기 위해 순간적으로 변하는 비절삭저항을 사용하는 것은 실용적이지 못하므로 평균 미변형칩두께에 대한 평균 비절삭저항을 구하기로 한다. 이론값과의 구별을 위해 K_T, K_R 대신에 K_p, K_R 을 사용하였다.

$$F_x(\phi) = K_T \sum_{i=1}^N f_i d \sin \theta_i \cos \theta_i + K_R \sum_{i=1}^N f_i d \sin \theta_i \sin \theta_i$$

$$F_y(\phi) = K_T \sum_{i=1}^N f_i d \sin \theta_i \sin \theta_i - K_R \sum_{i=1}^N f_i d \sin \theta_i \cos \theta_i \quad (12)$$

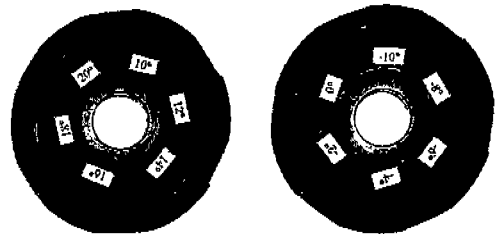
단인 절삭실험을 통해서 평균 미변형칩두께에 대한 비절삭저항값을 간단하게 구할 수도 있으나, 단인 절삭의 경우에는 각 날들에 반경방향 런아웃이 존재하기 때문에 공칭 이송율의 평균 미변형칩두께에 대한 비절삭저항을 구하는 것이 바람직하다. 즉, 주축 1회전에 대한 절삭력

데이터를 통해서 비절삭저항을 구하면 반경방향 런아웃에 의한 절삭력의 편차가 서로 상쇄되어 공칭 이송율의 평균 미변형칩두께에 대한 비절삭저항값을 얻을 수 있다. 여기서 평균 절삭력은 공구회전각에 따라 변하는 절삭력을 적분하여 구하는 것이 이상적이겠지만 절삭력 데이터가 이산적으로 들어오기 때문에 산술적으로 더하여 평균하는 방법을 사용한다.

4. 실험 및 결과

4.1 실험장치

실험에 사용된 머시닝센터는 대우 ACE V30이며, 절삭력 측정을 위한 장치로써 공구동력계는 Kistler Type 9257, Charge Amp는 Kistler Type 5011을 사용하였고 AD2210 보드를 통해 A/D변환을 한 후 데이터는 IBM 486 PC에 저장하였다. 공작물은 절삭특성이 좋고, 시중에서 많이 유통되는 알루미늄 A6061-T6을 사용하였다. 단인 절삭과 절삭조건에 따른 절삭력 실험에는 일반 정면밀링 절삭에 사용되는 대한중석 M415SP05R-12 커터를 사용하였다. 단인 절삭실험은 커터의 8개의 포켓 중 4곳에 삽입날을 장착하고, 절삭유는 사용하지 않았으며, 삽입날의 반경방향 런아웃은 다이알 게이지로 측정하였다. 공구경사각에 따른 절삭력 변화를 알아보기 위하여 특수 밀링커터를 제작하였다. 커터의 모델명은 대한중석 M545SE05R-12B, 삽입날은 알루미늄 절삭용으로 사용되는 대한중석 K10을 사용하였고, 리이드각은 45°로 고정되었으며 반경방향경사각과 측방방향경사각을 각각 변화시켰다.



(a) Axial Rake Angle Variation (b) Radial Rake Angle Variation

Fig. 5 Variation of Tool Rake Angles

4.2 절삭력 예측값과 측정값의 비교

4.2.1 단인 절삭

절삭조건은 주축회전수 600rpm, 이송율 300mm/min, 절삭깊이는 2mm로 주었다.

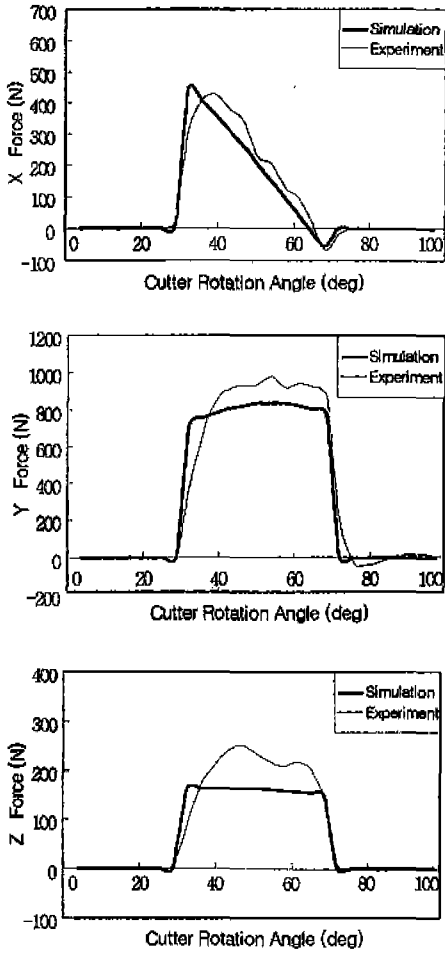


Fig. 6 Result of Fly Cutting

예측에 사용된 유효전단각과 마찰각은 유효경사각의 일차함수로 구하였으며, 칩유출각은 칩유동법칙을 따르고 전단응력은 상수로 두었다.⁽¹²⁾

$$\begin{aligned} \phi_e &= 0.1219\alpha_e + 0.5554 \\ \beta &= 0.3041\alpha_e + 0.6619 \end{aligned} \quad (13)$$

위의 절삭실험 결과를 살펴 보면 x방향의 절삭력의 경우에 측정값과 시뮬레이션 결과가 잘 일치함을 볼 수 있고, y방향 절삭력의 경우에는 예측값이 측정값에 비해 10% 정도 작게 나타났다. 이러한 결과를 보이는 이유는

절삭이 단일 전단면에서만 일어나는 것이 아니라 전단영역이 형성되어 이 영역에서 소성에 의한 변형경화가 일어나고, 절삭날에 공구반경이 존재하여 치수효과 등이 나타나기 때문이라고 생각된다. 반면에 z방향 절삭력의 경우는 측정값과 30% 정도의 오차를 나타내고 있다. 하지만 기존의 논문들에 비해서는 측정값에 많이 접근하고 있음을 볼 수 있다. 여러번의 실험을 통해 확인해 본 결과 z방향 절삭력 성분은 절삭조건에 따라 변동이 심하다는 것을 알 수 있었고 이러한 원인으로 인해 정확한 측방향 절삭력 예측은 용이하지 않다고 생각된다. 실제 절삭과정에서는 절삭날이 인입할 때 공구 접촉각에 따라 순간적으로 칩두께가 작은 과도절삭을 하므로, 절삭력이 서서히 증가하고 있음을 볼 수 있다.

4.2.2 다인 절삭

Fig.7 은 일반 밀링커터를 사용하여 4개의 삼입날을 90° 간격으로 장착하고, 절삭조건은 주축회전수 500rpm, 이송을 300mm/min, 절삭깊이 1mm로 한 경우의 실험결과이다. 절삭력의 크기에 있어서는 예측값에 비해 측정값이 다소 크게 나타나고 있으나 큰 편차는 보이지 않으며, 경향에 있어서 예측값과 실험값이 잘 근접하고 있음을 볼 수 있다. 런아웃은 측정의 어려움으로 인해 반경방향 런아웃만을 다이얼 게이지로 측정하여 예측

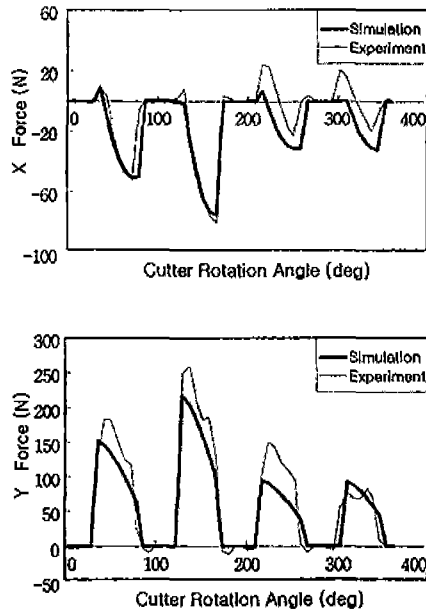


Fig. 7 Result of Multitooth Cutting

의 입력값으로 사용하였다. 첫번째 날의 런아웃을 0으로 한 경우에 다른 삽입날들의 런아웃은 각각 0.07, 0.03, -0.01mm의 값을 가졌다. 반경방향 런아웃이 각 날들의 절삭력 편차에 매우 중요한 영향을 미치고 있음을 볼 수 있다. 예측값과 측정값의 오차는 반경방향 런아웃의 측정 오차, 측방향 런아웃의 존재, 주축 편심, 커터의 피치오차 그리고 각 포켓마다의 공구경사각들의 차이등에 기인한다고 생각된다.

4.3 절삭조건에 따른 비절삭저항의 변화

일반 정면밀링 커터를 사용하여 평균 미변형칩두께, 주축회전수, 절삭깊이에 따른 비절삭저항의 변화를 알아보았다. 각각의 경우에 절삭조건은 주축회전수 600rpm, 절삭깊이 1mm (Fig.8), 절삭깊이 0.5mm, 날 당 이송량 0.5mm (Fig.9), 주축회전수 500rpm, 이송을 150mm/min (Fig.10)로 하였다.

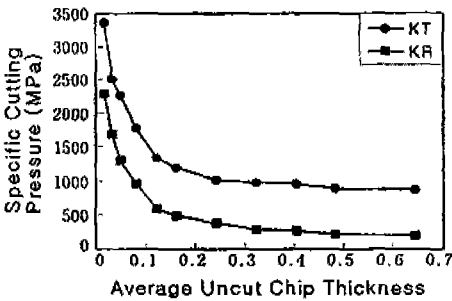


Fig. 8 Relationship between Specific Cutting Pressure & Average Uncut Chip Thickness

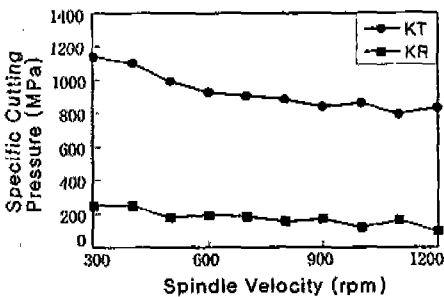


Fig. 9 Relationship between Specific Cutting Pressure & Spindle Velocity

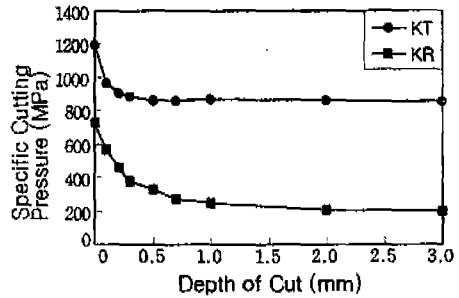


Fig. 10 Relationship between Specific Cutting Pressure & Depth of Cut

평균 미변형칩두께가 작아짐에 따라 비절삭저항은 급격히 증가하고 있음을 확인할 수 있었고 이 부분은 기존의 논문들에서 많이 고려되었다. 절삭속도에 대해서는 변화가 그렇게 크지 않지만 주어진 범위에서 속도가 증가함에 따라 다소 감소하는 경향을 보이고 있다. 절삭깊이가 작아질수록 비절삭저항은 평균 미변형칩두께에 대한 것과 유사하게 지수 함수적으로 증가함을 볼 수 있고, 이는 공구반경의 존재에 의한 치수효과 때문이라고 판단되며 절삭력 예측시 날 당 이송량과 더불어 미시한 영역에서 고려하여야 할 부분이라고 생각된다.

4.4 공구경사각에 따른 비절삭저항의 변화

이송을 120mm/min, 주축회전수 500rpm, 절삭깊이는 2mm로 고정하고 공구경사각에 따른 비절삭저항의 변화를 알아보았다. 실험은 각각의 공구경사각에 대해서 7번씩 행하였으며, 구해진 비절삭저항의 평균값과 표준편차를 예측값과 비교하였다.(Fig.11, 12)

측방향경사각과 반경방향경사각이 증가함에 따라 비절삭저항 KT, KR값이 감소하고 있음을 볼 수 있고, 실험 결과와 시뮬레이션 결과가 그 크기와 경향에 있어서 잘 일치하였다. 이는 선삭에서 상면경사각이 증가함에 따라 절삭력이 줄어드는 결과와 같다고 할 수 있으며, 정면밀링 커터의 설계와 절삭력 예측시 고려되어야 할 부분이라고 생각된다. 공구경사각의 편차가 커지면 경향이 더욱 뚜렷하게 나타날 것으로 예측되나 여유각의 제한 등 커터 설계상의 한계 때문에 어려움이 있으리라 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 정면밀링 커터의 공구경사각이 절삭력에 미치는 영향을 선삭에서의 두 날 절삭모델을 도입하여 유

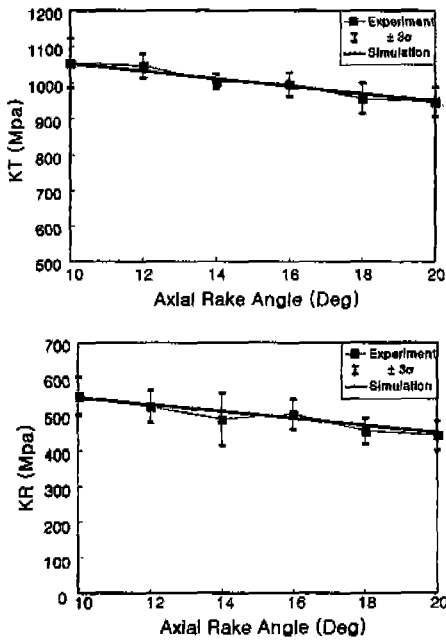


Fig. 11 Relationship between Specific Cutting Pressure & Axial Rake Angle

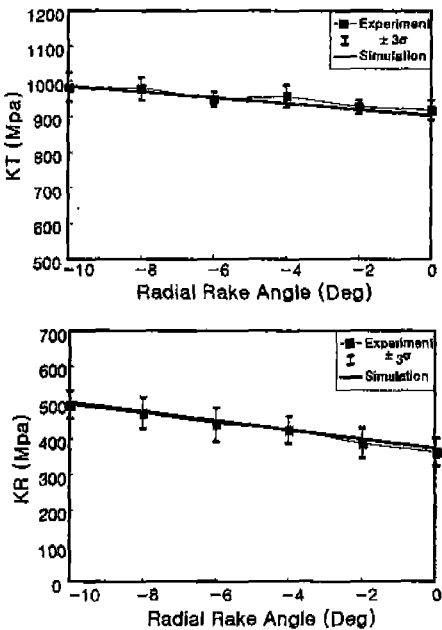


Fig. 12 Relationship between Specific Cutting Pressure & Radial Rake Angle

도하고 이를 통해 정면밀링에서의 절삭력을 예측하였으며, 전단 모델과 비절삭저항 모델을 비교하여 공구경사각이 비절삭저항에 미치는 영향을 예측하였다. 모델의 타당성을 검증하기 위하여 포켓마다 공구경사각이 다르게 설계된 특수 밀링커터를 제작하고, 실험을 통해 이론에 의한 예측값과 실험 결과가 잘 일치하고 있음을 확인하였으며, 이러한 결과는 가공조건의 선정이나 커터의 설계등에 효율적으로 이용될 수 있을 것이다. 날 당 이송량이 클 경우에는 미변형칩 단면적과 절삭력이 단순히 비례하지 않는다는 사실을 삼차원 절삭모델을 적용하여 유도하였고, 이 모델을 이용하여 절선, 반경방향 절삭력과 절삭조건만으로 축방향 절삭력을 예측할 수 있음을 보였다. 이송율, 절삭속도, 절삭깊이에 따른 비절삭저항의 변화를 알아보고 제시된 절삭력 예측 모델의 적용 범위를 규정하였다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소의 지원에 의해 연구되었으며, 본 연구를 위하여 정면밀링커터를 제작하여준 대한중석에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Kirk, J. A., "Matrix Representation and Prediction of Three-Dimensional Cutting Forces," J. of Eng. for Ind., Trans. ASME, Vol.99, pp. 828-834, 1977.
2. Stabler, G. V., "The Fundamental Geometry of Cutting Tools," Proc. of the Inst. of Mech. Eng., Vol.165, pp. 14-26., 1951.
3. Usui, E., "Analytical Prediction of Three Dimensional Cutting Process," J. of Eng. for Ind., Trans. ASME, Vol.100, pp. 222-235, 1978.
4. Oxley, P. L. B., "The Mechanics of Machining," HALESTED PRESS, PP. 97-105, 1989.
5. Lin, G. C. I., "Prediction of Cutting Forces and Chip Geometry in Oblique Machining from Flow Stress Properties and Cutting Conditions," Int. J. MTRD, Vol.18, pp. 117-130., 1978.

6. Fu, H. J., "A Mechanistic Model for the Prediction of the Force System in Face Milling Operations." J. of Eng. for Ind., Trans. ASME, Vol.106, pp. 81-88, 1984.
7. Shaw, M. C., "Metal Cutting Principles," CLARENDON PRESS, PP. 428-486, 1984.
8. Merchant, M. E., "Basic Mechanics of the Metal Cutting Process," J. of App. Mech., Trans. ASME, Vol.11, pp. 168-175, 1944.
9. Merchant, M. E., "Mechanics of the Metal Cutting Process." J. of App. Phys., Vol.16, pp. 267-275, pp. 318-324, 1945.
10. Cook, N. H., "Manufacturing Analysis", ADDISON-WESLEY, PP. 70-81., 1966.
11. Matellotti, M. E., "An Analysis of the Milling Process," Trans. ASME, Vol.63, pp. 677-700, 1941.
12. Matellotti, M. E., "An Analysis of the Milling Process, Part II - Down Milling," Trans. ASME, Vol.67, pp. 233-251, 1945.