

마모를 고려한 드릴 절삭력 모델

최영준*(서울대 대학원 기계항공공학부), 주종남(서울대 기계항공공학부)

Drilling force model considering tool wear

Y. J. Choi (Graduate School, SNU), C. N. Chu (School of Mech. & Aero. Engineering, SNU)

ABSTRACT

A mechanistic model is developed to predict the thrust force and cutting torque of drilling process including wear. A mechanistic oblique cutting force model is used to develop the drilling force model. The cutting lips are divided into small elements and elemental forces are calculated by multiplying the specific cutting pressure with the elemental chip area. The specific cutting pressure is a function of chip thickness, cutting velocity, rake angle and wear. The total forces are then computed by summing the elemental forces. Measured cutting forces are in good agreement with the simulated cutting forces.

Key Words : Elemental forces (미소 절삭력), Flank wear (플랭크 마모), Oblique cutting (3 차원 절삭), Specific cutting pressure (비절삭 저항),

1. 서론

드릴링 과정에서 발생하는 버, 형상 및 표면 오차, 칩터, 공구 마모, 공구 파손 등의 문제는 절삭력과 밀접한 관련이 있다. 절삭력은 공구와 공작물의 물성치, 공구의 기하, 절삭 조건 등에 의하여 결정된다. 임의의 드릴 기하와 공작물에 대하여 절삭력을 예측하는 것은 생산성을 높일 수 있고 드릴의 성능을 향상 시킬 수 있다.

Williams⁽¹⁾는 2 차원 단인 공구에서의 절삭력 모델을 사용하여 드릴의 절삭력을 예측하였다. 하지만 2 차원 절삭 모델의 가정으로 인하여 오차가 크게 발생하였다. Armarego⁽²⁾ 등은 선반에서의 2 차원 절삭 실험에서 전단 응력, 마찰각, 칩 길이 비와 같은 데이터를 이용하고 드릴 인선을 미소 영역으로 분리하여 각 영역에 대하여 3 차원 절삭 이론을 적용하여 절삭력을 예측하였다. Rubenstein⁽³⁾은 트위스트 드릴을 스페이드 드릴(spade drill)로 가정하고 2 차원 절삭 이론을 이용하여 절삭력을 예측하였다. Agapiou⁽⁴⁾ 등은 드릴 선단의 가하를 매개 변수법을 사용하여 표현하고 선반에서의 실험적인 절삭력 식을 사용하여 절삭력을 계산하였다. Rincon⁽⁵⁾ 등은 드릴의 횡방향 변형을 고려한 절삭력 모델을 제시하였으며 Chandraskharan⁽⁶⁾ (7) 등은 미소 날에 3 차원

절삭 모델을 적용하고 간단한 실험을 통해 비절삭 저항을 계산하여 임의의 드릴 기하와 엔드밀에서 절삭력을 계산하였다.

본 논문에서 드릴 립은 미소 요소로 분할하고 각각의 요소에 3 차원 절삭 모델을 적용하며 칩층부는 절삭 영역과 압입 영역으로 구분하여 절삭력을 계산한다. 그리고 비절삭 저항에 플랭크 마모항을 포함하여 마모에 의한 절삭력의 증가를 고려하였다.

2. 절삭력 모델

2.1.3 차원 절삭 모델

3 차원 절삭에서 공구 경사면에서의 절삭력 시스템은 Fig 1 과 같다. 공구에 작용하는 절삭력은 공구 경사면에 작용하는 힘을 좌표 변환하여 구할 수 있다

마찰 분력(\bar{F}_f)은 칩의 유동 방향과 같은 방향으로 작용하며 수직 분력(\bar{F}_n)은 공구의 경사면에 수직인 방향으로 작용한다. 이 두 힘과 칩의 유동 각(η_c)이 결정되면 공구에 작용하는 주분력(\bar{F}_c), 배분력(\bar{F}_t), 횡분력(\bar{F}_l)은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

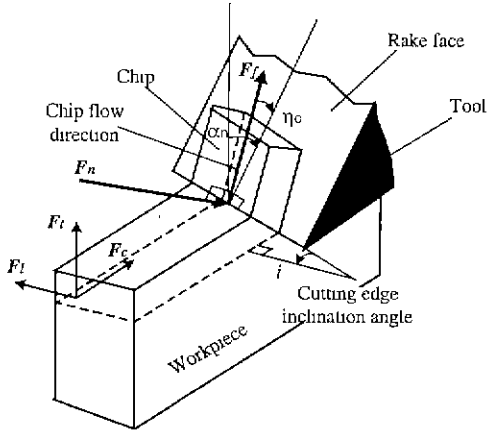


Fig. 1 Cutting force system in oblique cutting process

$$\begin{aligned}
 F_r &= F_f \cos \eta_c \cos \alpha_n - F_n \sin \alpha_n \\
 F_r &= F_f (\sin \eta_c \sin i + \cos \eta_c \cos i \sin \alpha_n) + F_n \cos i \cos \alpha_n \quad (1) \\
 F_t &= F_f (\cos \eta_c \sin i \sin \alpha_n - \sin \eta_c \cos i) + F_n \sin i \cos \alpha_n
 \end{aligned}$$

마찰 분력과 수직 분력은 각각의 비절삭 저항에 미 변형 칩면적을 곱하여 계산할 수 있다.

$$F_n = K_n A_c, \quad F_f = K_f A_c \quad (2)$$

2.2 드릴 립에서의 절삭력 모델

Fig. 2 와 같이 드릴 립을 미소 요소로 분할한다. 그리고 드릴 중심축에서 r 만큼 떨어진 곳에 작용하는 미소 수직 분력과 마찰 분력을 각각 dF_n , dF_f 라 할 때 그 값은 식 (2)에 의하여 다음과 같이 계산된다.

$$dF_n = K_n dA_c, \quad dF_f = K_f dA_c \quad (3)$$

그리고 미소 칩면적은 회전 당 이송량과 드릴 기하에 의하여 다음과 같이 정의된다.

$$dA_c = \frac{f_r \sin k}{2 \sin k} dy \cos i \quad (4)$$

여기서 i 는 미소 요소에서의 기울임각으로 웹두께 $(2w)$, 드릴의 선단각 (k) 에 의하여 다음과 같이 표현된다

$$i = \sin^{-1} \left(\frac{w}{r} \sin k \right) \quad (5)$$

미소 요소에 작용하는 수직 분력과 마찰 분력을 계산한 후 식 (1)을 사용하여 미소 주분력, 배분력,

횡분력으로 좌표변환을 한다.

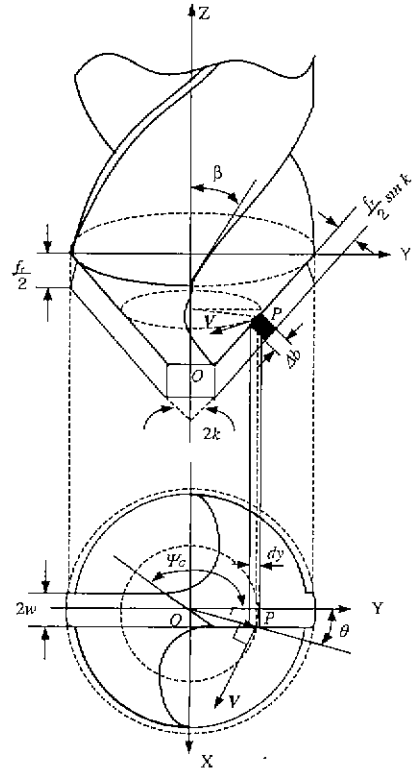


Fig. 2 Elemental model for the cutting lips of a drill

그런데 일반적으로 칩의 유동각을 측정하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 여기서는 칩의 유동각은 기울임각으로 근사화 할 수 있다는 Stabler의 가정을 사용한다. 그리고 드릴 립에서의 수직 경사각은 r 에 따라서 음에서 양으로 크게 변한다. Armarego⁽³⁾는 웹두께, 선단각, 헬릭스 각 (β) 을 사용하여 드릴 중심축에서 r 만큼 떨어진 곳에서의 수직 경사각을 표현하였다.

$$\begin{aligned}
 \tan \alpha_r &= \frac{\tan \beta}{\sin k} (\cos \theta + \sin \theta \tan \theta \cos^2 k) \\
 &\quad - \tan \theta \cos k \quad (6)
 \end{aligned}$$

$$\text{여기서, } \theta = \text{web angle} = \sin^{-1} \left(\frac{w}{r} \right)$$

미소 주분력, 배분력, 횡분력을 미소 절삭 추력, 절삭 토크로 다시 변환하기 위하여 Fig. 3 과 같이 미소 요소에 좌표계를 설정한다. z 축은 드릴 축과 평행하며, y 축은 Fig. 2 에서와 같이 드릴 선단을 XY 평면에 투영했을 때 미소 요소의 립 방향과 일치하고 x 축은 투영된 미소 요소의 립에 수직인 방향이 된다.

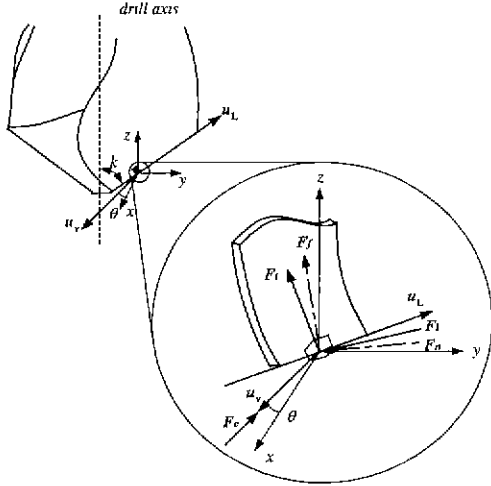


Fig. 3 Force coordinate system at an element on the drill lips

미소 요소의 립과 절삭 속도 방향의 단위 \bar{u}_L, \bar{u}_v 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\bar{u}_L &= 0\hat{e}_x + \sin k\hat{e}_y + \cos k\hat{e}_z \\ \bar{u}_v &= \cos\theta\hat{e}_x - \sin\theta\hat{e}_y + 0\hat{e}_z\end{aligned}\quad (7)$$

미소 주분력의 방향은 절삭 속도의 방향과 일치하므로 다음과 같이 표현된다.

$$\overline{dF}_t = dF_t(-\cos\theta\hat{e}_x + \sin\theta\hat{e}_y + 0\hat{e}_z) \quad (8)$$

미소 배분력은 절삭 인선과 속도 벡터를 포함한 평면에 수직한 방향으로 작용하고 있으므로 \bar{u}_L, \bar{u}_v 를 외적하여 그 방향을 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}\overline{dF}_r &= dF_r \left(\frac{\bar{u}_v \times \bar{u}_L}{|\bar{u}_v \times \bar{u}_L|} \right) \\ &= dF_r \left(\frac{-\sin\theta \cos k}{\cos i} \hat{e}_x + \frac{-\cos\theta \cos k}{\cos i} \hat{e}_y + \frac{\cos\theta \sin k}{\cos i} \hat{e}_z \right)\end{aligned}\quad (9)$$

미소 횡분력은 주분력과 배분력에 수직한 방향으로 작용하고 있으므로 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}\overline{dF}_c &= dF_c \left(\frac{\overline{dF}_t \times \overline{dF}_r}{|\overline{dF}_t \times \overline{dF}_r|} \right) \\ &= dF_c \left(\frac{-\sin\theta \cos\theta \sin k}{\cos i} \hat{e}_x + \frac{-\cos^2\theta \sin k}{\cos i} \hat{e}_y + \frac{-\cos k}{\cos i} \hat{e}_z \right)\end{aligned}\quad (10)$$

따라서 미소 요소에 작용하는 미소 절삭 추력은 미소 주분력, 배분력, 횡분력의 z 축 방향 성분을

모두 합하여 계산할 수 있고 미소 절삭 토크는 미소 주분력에 중심부터의 거리를 곱하여 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}dF_z &= dF_t \frac{\cos\theta \sin k}{\cos i} - dF_r \frac{\cos k}{\cos i} \\ dT_z &= r dF_c\end{aligned}\quad (11)$$

미소 절삭 추력과 절삭 토크는 미소 요소 위에 부착된 xyz 좌표계에서 계산된 결과지만 고정 좌표계 XYZ 의 Z 축과 z 축의 방향이 일치하므로 다른 좌표변환 없이 각각 미소 요소에 작용하는 힘들을 합하면 드릴 립에 작용하는 전체 절삭 추력과 절삭 토크를 계산할 수 있다

$$\begin{aligned}F_{TLLP} &= \sum_{Lips} \sum_{Elements} dF_z \\ T_{LLP} &= \sum_{Lips} \sum_{Elements} dT_z\end{aligned}\quad (12)$$

2.3 치즐 에지에서의 절삭력 모델

치즐부는 절삭이 일어나지 않고 이송에 의하여 압입이 일어나는 압입 영역(indentation zone)과 공구 경사각이 큰 음의 값을 갖고 절삭이 일어나는 2 차 절삭 영역으로 Fig. 4 처럼 구분할 수 있다.

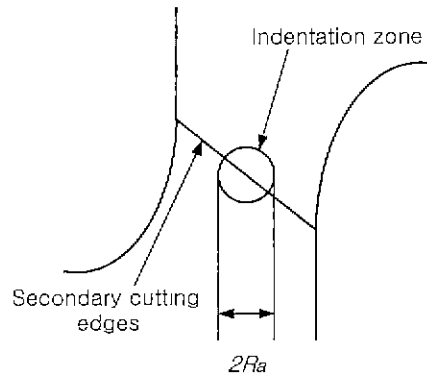


Fig. 4 Cutting region on the chisel edge

Mauch⁽⁹⁾ 등은 드릴 여유면의 간섭을 해석하여 압입 영역의 반경을 다음과 같이 계산하였다

$$R_a = \frac{f_r}{2 \tan(\pi/2 - k)} \quad (13)$$

압입 영역은 소성 재료를 압입하고 있는 칩기로 모델링 할 수 있다. Kachanov⁽¹⁰⁾ 는 미끄럼선장(slip-line field)을 이용하여 칩기에 작용하고 있는 압입력을 구하였다. 미끄럼선법의 헤(ϵ)를 이용하여 접촉

길이(l)와 썰기의 표면에 작용하는 압력(p)를 계산할 수 있다.

$$2\gamma_w = \varepsilon + \cos^{-1}\left\{\tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varepsilon}{2}\right)\right\}$$

$$l = \frac{f_r}{2(\cos\gamma_w - \sin(\gamma_w - \varepsilon))} \quad (14)$$

$$p = 2K(1 + \varepsilon)$$

여기서, K 는 공작물의 항복 응력을 나타내고 γ_w 는 썰기각으로 정적 경사각($\alpha_{n,s}$)의 두 배에 해당한다. 정적 경사각은 드릴 선단각과 치즐 에지각으로 표현된다.

$$\alpha_{n,s} = -\tan^{-1}\{\tan k \cos(k - \Psi_c)\} \quad (15)$$

따라서 압입 영역에 작용하고 있는 절삭 추력은 다음과 같이 표현된다.

$$F_{in_ind} = 2pl \sin\gamma_w (2R_n)$$

$$= \frac{4K(1 + \varepsilon)f_r R_n \sin\gamma_w}{[\cos\gamma_w - \sin(\gamma_w - \varepsilon)]} \quad (16)$$

2 차 절삭 영역에서의 절삭력은 드릴 립에서의 모델을 그대로 적용할 수 있다. 하지만 치즐 에지에서의 접선 속도가 이송 속도에 비하여 작기 때문에 더 이상 이송 속도의 영향을 무시할 수 없다 따라서 실제 절삭 속도(\bar{V}_R)는 접선 속도(\bar{V})와 이송 속도(\bar{V}_f)를 Fig. 5 처럼 벡터적으로 합해야 한다.

절삭에서 경사각은 실제 절삭 속도의 방향에 수직인 것이 유효한 값이 된다 따라서 이송 속도를 고려한 동적 경사각은 정적 경사각에 이송 각을 합하여 계산할 수 있다

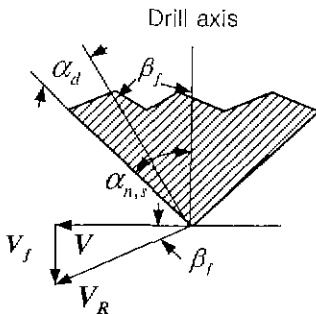


Fig 5 Effect of feed velocity at the chisel edge

$$\alpha_n = \alpha_{n,s} + \beta_f$$

여기서, $\beta_f = \tan^{-1}\left(\frac{f_r}{2\pi r}\right)$ (17)

마찰 분력과 수직 분력을 계산한 후 절삭 추력과 절삭 토크를 계산하기 위하여 좌표 변환을 할 때에는 치즐 에지의 정적 경사각을 사용한다.

2.4 비절삭 저항

비절삭 저항은 일반적으로 칩두께, 절삭 속도, 경사각의 지수 형태로 표현된다 하지만 드릴에서는 경사각이 음에서 양으로 크게 변하기 때문에 지수 형태로 표현하면 복소수가 나오므로 경사각 자체로 사용할 수 없다. 따라서 음의 값이 나오지 않게 하기 위하여 경사각을 $(1 - \sin\alpha)$ 의 형태로 바꾸어 지수 형태로 표현한 결과를 사용한다. 그리고 위의 변수들 이외에 드릴의 플랭크 각도(v_b) 항을 포함하여 플랭크 각도가 발생하였을 때의 절삭 추력과 절삭 토크를 계산할 수 있도록 하였다.

$$\ln K_{n0} = a_0 + a_1 \ln t_c + a_2 \ln V + a_3 \ln(1 - \sin\alpha_n)$$

$$\ln K_{nv} = b_0 + b_1 \ln t_c + b_2 \ln V + b_3 \ln(1 - \sin\alpha_n) + b_4 \ln(v_b) \quad (18)$$

$$K_n = K_{n0} + K_{nv}$$

$$\ln K_{f0} = c_0 + c_1 \ln t_c + c_2 \ln V + c_3 \ln(1 - \sin\alpha_n)$$

$$\ln K_{fv} = d_0 + d_1 \ln t_c + d_2 \ln V + d_3 \ln(1 - \sin\alpha_n) + d_4 \ln(v_b) \quad (19)$$

$$K_f = K_{f0} + K_{fv}$$

3. 계수 결정 방법

3.1 비절삭 저항의 계수

비절삭 저항을 구하기 위하여 Fig 6 과 같이 파일릿 구멍을 미리 가공한 상태에서 드릴 립이 공작물에 완전히 진입할 때 까지 구멍을 가공하면서 절삭 추력과 절삭 토크를 측정한다. 드릴이 공작물에 점진적으로 진입할 때 각 위치에서 절삭 추력과 절삭 토크의 증분을 계산하여 미소 영역에서의 미소 절삭 추력과 절삭 토크를 구한다. 식 (1), (3), (10)을 사용하면 미소 절삭 토크와 절삭 추력을 비절삭 저항과 비소 칩면적으로 다음과 같이 표현된다

$$dF_c = dA_c [K_f \{\cos\alpha_n \cos\theta \sin k + \sin i \cos k - \sin\alpha_n \cos k \sin i\}$$

$$- K_n \left\{ \frac{\sin\alpha_n \cos\theta \sin k}{\cos i} + \cos\alpha_n \cos k \tan i \right\}] \quad (20)$$

$$dT_c = rdA_c [K_f \{\sin^2 i + \cos^2 i \sin\alpha_n\} + K_n \cos i \cos\alpha_n]$$

여기서, α_n , θ , i 와 같은 절삭각들과 미소 칩면적을 계산할 수 있으므로 식 (20)에서 K_n , K_f 를

구할 수 있다 구해진 K_n, K_f 를 사용하여 식 (18)의 계수들은 직선 회귀법으로 구할 수 있다. 플랭크 마모가 포함된 비절삭 저항을 구할 때에는 먼지 마모가 포함되지 않은 경우의 비절삭 저항의 계수를 결정하고 측정된 비절삭 저항에서 마모가 포함되지 않은 비절삭 저항을 뺀 후 그 값을 직선으로 회귀하여 계수들을 결정한다.

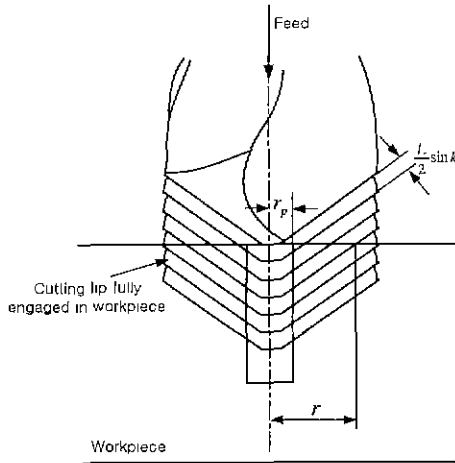


Fig. 6 Method of specific cutting pressure estimation

3.2 공작물의 항복 강도

치즐 에지의 압입 영역에서 절삭 추력을 계산하기 위해서는 공작물의 항복 강도를 결정해야 한다. 재료 핸드북에 나와있는 수치는 특정한 변형률과 온도에서 결정된 것으로 실제 절삭 과정에 적용하는 것이 힘들다. 따라서 앞에서 구한 비절삭 저항을 이용하여 드릴 립과 치즐 에지의 2 차 절삭 영역에서의 절삭 추력을 계산하고 측정된 절삭 추력에서 그 값을 뺀 후 식 (16)을 이용하여 재료의 항복강도를 계산한다

3.3 계수 결정

비절삭 저항과 재료의 항복 강도를 결정하기 위하여 직경 10mm 의 HSS 트위스트 드릴을 사용하여 SM45C 을 Fig. 6 과 같은 방법으로 구멍을 가공하였다. 드릴은 새 드릴과 인위적으로 마모를 발생시킨 두 종류의 드릴을 사용하였다. 계산된 비절삭 저항의 계수는 Table 1 과 같다. 재료의 항복 강도는 760.6 N/mm^2 으로 계산되었다

4. 절삭력 모델 검증

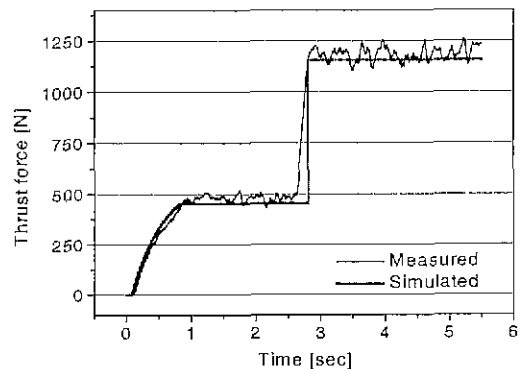
절삭력 모델을 검증하기 위하여 2 종류의 실험을 수행하였다 첫번째 실험은 드릴의 직경이 바뀐

Table 1 Coefficients for the specific cutting pressure

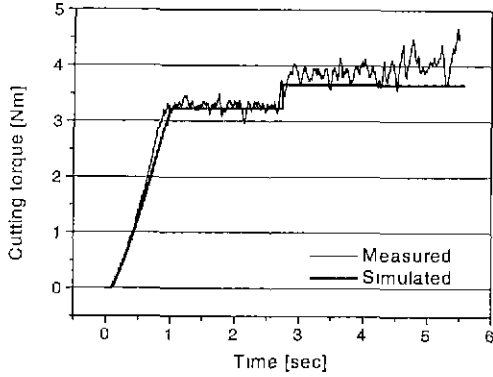
i	a_i	b_i	c_i	d_i
0	7.5520	12.0873	6.8354	7.7094
1	-0.3386	-0.4834	-0.4426	-0.3064
2	-0.1750	-2.0720	-0.2115	-0.3549
3	1.0934	0.6788	0.2992	-0.3464
4		1.5413		0.3442

경우이다. 10 mm 의 드릴을 사용하여 결정된 비절삭 저항의 계수 및 항복 강도를 직경 직경 8 mm 의 드릴로 가공할 때에 적용하였다. 각각의 드릴에서 두 드릴은 직경과 랩두께를 제외한 드릴 선단각, 헬릭스각, 치즐 에지각은 모두 동일하다. 두 번째 실험은 직경 10 mm 의 드릴에 인위적으로 플랭크 마모를 발생시킨 후 측정된 절삭력과 마모를 고려한 경우와 그렇지 않은 경우의 절삭력을 비교하였다.

Fig. 7, 8 은 측정된 절삭력과 계산된 절삭력을 나타낸다 직경 10 mm 드릴에서 측정된 계수를 직경 8 mm 에 적용한 경우에도 측정된 절삭력과 계산된 절삭력이 잘 일치하는 것을 Fig. 7 에서 볼 수 있다. 따라서 드릴이 기하적으로 동일하면 크기에 상관없이 특정한 드릴에서 계산된 비절삭 저항을 사용하여 절삭력을 예측할 수 있다고 판단할 수 있다. 플랭크 마모가 존재할 때 마모가 고려되지 않은 경우는 35% 이상의 오차가 발생한 반면 마모를 고려한 경우 치즐 에지가 공작물에 닿기 전까지는 6%의 오차가 발생하였다. 하지만 치즐 에지가 공작물에 닿은 후에는 14% 정도의 오차가 발생하였다. 이것은 재료의 항복 강도를 계산할 때 마모가 없는 경우와 마모가 있는 경우의 항복 강도의 평균을 하였기 때문이다. 일반적으로 마모가 있는 경우는 가공 중 절삭 온도가 더 높아지고 이로 인해 공작물에 열 경화층이 발생하여 재료의 항복 강도가 더 높아진다.

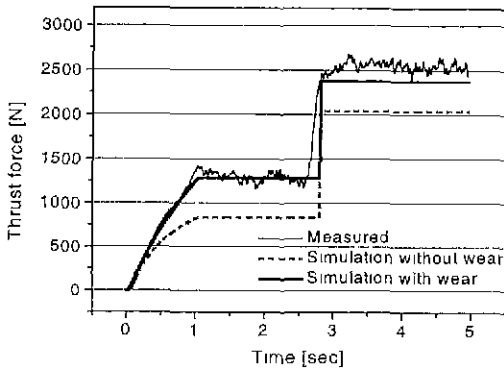


(a) Thrust force

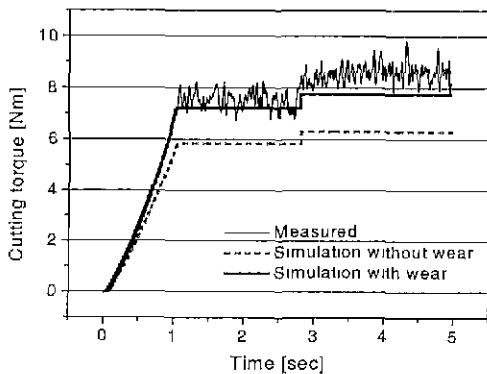


(b) Cutting Torque

Fig. 7 Comparison of the measured and simulated cutting forces (ϕ 8, 1000 rpm, 150 mm/min)



(a) Thrust force



(b) Cutting torque

Fig. 8 Comparison of the measured and simulated cutting forces (ϕ 10, 800 rpm, 150 mm/min, $V_b=0.27$ mm)

5. 결론

드릴 립과 치출 에지의 2 차 절삭 영역은 미소 절삭 요소로 분할한 후 각각의 요소에 3 차원 절삭 이론을 적용하며 치출 에지의 압입 영역은 쇄기로

모델링하여 절삭 추력과 절삭 토크를 계산한 후 이 값들을 모두 합하여 드릴에 작용하고 있는 전체 절삭력들을 계산하였다. 플랭크 마모를 비절삭 저항의 인자로 설정하여 마모를 고려하여 절삭력을 계산할 수 있다. 드릴 직경을 바꾸고 마모가 생성된 드릴에 적용하여 절삭력을 계산한 결과 측정된 절삭력과 유사한 것을 알 수 있다.

참고문헌

- Williams, R. A., "A Study on the Drilling Process," ASME J. of Eng. for Ind., Vol. 106, pp. 1207-1215, 1974
- Wiriyacosol, S. and Armarego, E. J., "Thrust and Torque Prediction in Drilling from a Cutting Mechanics Approach," Annals of the CIRP, Vol. 28, pp. 87-91, 1979
- Rubenstein, C "The Torque and Thrust Force in Twist Drilling -I. Theory," Int. J. of Mach. Tools. Manufact., Vol. 31, pp. 481-489, 1991
- Stephenson, D. A. and Agapiou, J. S., "Calculation of Main Cutting Edge Forces and Torque with Arbitrary Point Geometries," Int. J. of Mach. Tools. Manufact., Vol. 32, pp. 521-538, 1992
- Rincon, D. M and Ulsoy, G., "Effects of Drill Vibrations on Cutting Forces and Torque," Annals of the CIRP, Vol. 43, pp. 59-62, 1994
- Chandrasekharan V., Kapoor S. G and DeVor R. E., "A Mechanistic Approach to Predicting Cutting Forces in Drilling With Application to Fiber-Reinforced Composite Materials," ASME J of Eng for Ind., Vol. 117, pp. 559-570, 1995
- Chandrasekharan V., Kapoor S. G and DeVor R. E., "A Mechanistic Model to Predict the Cutting Force System for Arbitrary Drill Point Geometry," ASME J. of Eng. for Ind., Vol. 120, pp. 563-570, 1998
- Armarego, E. J. and Cheng, C. Y., "Drilling with Flat Rake Face and Conventional Twist Drills-I Theoretical Investigation," Int. J. of Mach. Tools. Manufact., Vol. 12, pp 17-35, 1972
- Mauch, C. A and Lauderbaugh, L. K., "Modeling the Drill Process - An Analytical Model to Predict Thrust Force and Torque," Computer Simulation of Manufacturing Processes, ASME PED, Vol 48, pp. 59-65, 1990
- Kachanov, L. M., *Foundations of the Theory of Plasticity*, North-Holland Publishing Co., 1971