韓國精密工學會 2002年度 春季學術大會論文集 pp.1055~1058 KSPE 02S236

드릴가공에 대한 유한요소해석

김국원 (순천향대 기계공학과), 안태길* (호서대 기계공학과)

A Finite Element Analysis of the Drilling Process

K. W. Kim(Mech. Eng. Dept. SCHU), T.-K. Ahn(Mech. Eng. Dept. HSU)

ABSTRACT

Drilling process is one of the most common, yet complex operations among manufacturing processes. The performance of a drill is largely dependent upon drilling forces. Many researches focused on the effects of drill parameters on drilling forces. In this paper, the stresses occurring in drilling process are analyzed by finite element method. The analytic drilling forces considering the drill parameters and drilling conditions are used. Also, with ANSYS, geometric modeling and mesh generation of drill is performed automatically. From the study, optimal drill design and drilling condition determination may be achieved.

Key Words : Drilling process(드릴가공), Stress(응력), Finite element analysis(유한요소해석)

1. 서론

드릴 가공은 생산공정에서 가장 중요한 공정중의 하나이며 또한 가장 복잡한 작업중의 하나이다. 최근 정밀하고 경제적인 구멍가공작업에 대한 요청이 증가하고 있으며, 또한 전자산업의 발전에 따라 작은 직경의 구멍가공작업이 증가하고 있다. 전자회로기판의 경우 0.1mm 이하의 미세구멍이 요구되고 있는데, 구멍의 직경이 작아질수록 이를 수행하기 위한 가공비용은 급격히 증가하므로 적합한 공구선정과 가공조건의 수립이 매우 중요하게 대두된다.

드릴가공의 정밀도는 가공 시 발생하는 절삭력과 밀접한 관련이 있다. 따라서 드릴의 형상 및 가공조건이 절삭력에 미치는 영향에 대하여 많은 연구가 이루어졌으나, 대부분 실험적 방법을 통한 제한된 조건 하에서 유효한 결과들이었다.[1] 최근 유한요소법을 이용하여 드릴의 변형을 예측하는 몇몇 연구들이 발표되었다.[2] 드릴의 형상은 3 차원 모델링되였으나, 하중조건이 드릴의 이송과 가공물 경도의 함수로 단순화 되었다. Hinds 등[3]은 실험을 통하여 드릴에 작용하는 절삭력을 구한 다음 이를 하중조건으로 하여 미세드릴의 응력상태를 분석하였다.

드릴의 형상변화에 따른 절삭력의 변화를 분석하고 절삭력을 감소시킬 수 있는 형상변수를 찾는 연구들이 많이 수행되었다. 그러나 이 경우 드릴의 응력 및 변형이 함께 고려되어야 드릴의 수명 및 성능을 제대로 분석할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 드릴의 형상변화에 따른 응력변화를 분석하였다. 해석의 편의를 위해 드릴 형상 변수의 입력만으로 드릴 포인트를 포함한 공구 형상이 모델링되며, 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS 를 이용하여 유한요소메쉬 작업까지 자동적으로 이루어진다. 또한 드릴 형상 및 가공조건이 고려된 절삭력 모델이 사용되어 실제 드릴가공을 수행하기 전 드릴의 응력상태 및 변형을 예측할 수 있다. 따라서 드릴 공정에 있어서 적합한 공구형상 및 가공조건을 수립하는데 효과적으로 이용될 수 있다.

2. 형상 모델링

드릴 형상에 대한 수학적 관계식에 의해 드릴의 3 차원 형상을 자동적으로 모델링하는 작업을 수행하였다.

드릴 형상을 모델링하기 위해서는 드릴 포인트의 각 부분에 대한 좌표값이 필요하다. Fig. 1 은 드릴 포인트 형상을 정의하는 주요 부위를 나타낸다.

각 부위를 계산하기 위한 수식들을 Table 1 에 나타내었다.

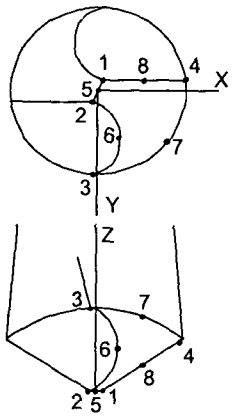


Fig. 1 Nodal point on the drill point

Table 1 Coordinates of nodal point

Nodal point	Coordinates x	Y	Z
1	$0.5B/\tan\psi$	-0.5B	0
2	$-0.5B/\tan\psi$	0.5B	0
3	$0.5D\cos\theta'_2$	$0.5D\sin\theta'_2$	z_{04} $+(\theta_L/360)\pi D\tan\nu$
4	$0.5(D^2-B^2)^{1/2}$	-0.5B	0.5 $(D-B/\tan\psi)/\tan\rho$
5	0	0	0
6	$0.5(x_{03}-x_{02})$	d/2 $+0.5(y_{03}-y_{02})$	$0.5z_{03}$
7	0.5D $\cos(\theta_L/2)$	0.5D $\sin(\theta_L/2)$	z_{04} $+(\theta_L/720)\pi D\tan\nu$
8	$0.5(x_{01}-x_{04})$	-0.5D	$0.5\ z_{04}$

여기서 D(mm) : drill diameter, B(mm) : web thickness
ρ: point angle, ν: clearance angle
ψ : chisel edge angle, $\theta'_2 = \theta'_L - \theta'_1$
θ'_L: land angle = 180/(1+F), F: flute/land ratio
$\theta'_1 = \tan^{-1}(y_{04}/x_{04})$

드릴 포인트의 형상은 드릴 축을 따라 회전하면서 반복된다. 즉, 드릴 포인트 곡면을 기준곡면으로 잡으면 드릴의 형상은 이 기준 곡면이 드릴 축을 따라 반복되어 이루어진다고 볼 수 있으며 이때 helix angle 만큼 회전도 동시에 이루어진다. 즉 기준곡면으로부터 S 만큼 떨어진 부분은 기준곡면에 대하여 다음과 같은 각도만큼 회전되어 있다.

$$\theta = 2\pi S/L \quad (1)$$

여기서 L: 피치길이$=\pi D/\tan\delta$

δ : helix angle

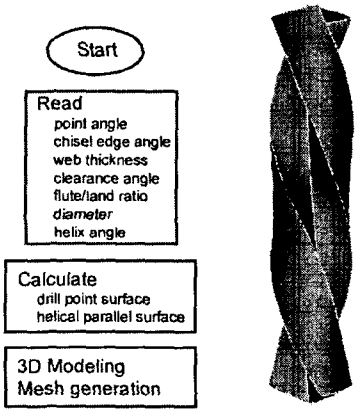
따라서 기준곡면의 좌표값을 (x0, y0, z0)라 하면, 임의의 거리 S 만큼 떨어진 곡면의 x, y, z 좌표값은 다음과 같다.

$$x = x0\cos\theta - y0\sin\theta \quad (2)$$
$$y = x0\sin\theta + y0\cos\theta \quad (3)$$
$$z = z0 + S \quad (4)$$

대칭형상을 이루는 다른 곡면은 다음과 같이 계산된다.

$$x' = -x.\ y' = -y,\ z' = z \quad (5)$$

이상의 과정을 거쳐 드릴 형상을 결정할 수 있으며, 이러한 과정은 프로그램화하여 자동적으로 계산되게 하였다. Fig. 2(a)는 자동적으로 드릴 형상을 모델링하는 과정을 흐름도로 나타낸 것이며 (b)는 생성된 드릴의 3 차원 형상을 보여준다. (c)는 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS 의 메쉬기능을 이용하여 만들어진 유한요소모델을 보여준다.



(a) drill modeling flow chart (b) geometric modeling

(c) mesh generation

Fig. 2 Automated 3D modeling and mesh generation

3. 절삭력 모델

일반적으로 드릴의 형상 및 가공조건에 따라 발생하는 절삭저항은 큰 차이를 보인다. Lee[4]의 연구에 의하면 절삭날 및 chisel edge 부분에서의 전단응력을 실험적으로 구한다면, 해석적으로 드릴 가공시 발생하는 토크와 드러스트를 예측할 수 있었다. 이를 간단히 정리하면 다음과 같다. 보다 자세한 내용은 문헌을 참고하기 바란다.

• 절삭날에 작용하는 절삭력

$$F_{cl} = \frac{t_1 k_l \cos(\lambda_N - \alpha_D + \beta)}{\sin\Phi_N \cos(\Phi_N + \lambda_N - \alpha_D)} \quad (6)$$

$$F_{tl} = \frac{t_1 k_l \sin(\lambda_N - \alpha_D + \beta)}{\sin\Phi_N \cos(\Phi_N + \lambda_N - \alpha_D)} \quad (7)$$

$$P = \sqrt{F_{cl}^2 + F_{tl}^2}\ \sin\lambda \tan\eta \quad (8)$$

• chisel edge 에 작용하는 절삭력

$$F_{cc} = \frac{t_2 k_c \cos(\lambda_C - \alpha_{DC} + \beta)}{\sin\Phi_C \cos(\Phi_C + \lambda_C - \alpha_{DC})} \quad (9)$$

$$F_{tc} = \frac{t_2 k_c \sin(\lambda_C - \alpha_{DC} + \beta)}{\sin\Phi_C \cos(\Phi_C + \lambda_C - \alpha_{DC})} \quad (10)$$

여기서 k_l, k_c 은 절삭날 및 chisel edge 에서의 전단응력이며 실험을 통하여 결정된다. 알루미늄합금 2024 를 가공하는 경우 다음과 같다.

$$k_l = 1.50\times10^4 \log\dot{\gamma} - 1.40\times10^4 \quad (11)$$

$$k_c = 9.80\times10^7 \log\dot{\gamma} - 7.17\times10^7$$

사용된 다른 변수들 중 몇 가지를 소개하면 다음과 같다.

· t_1 : 절삭날에서의 절삭깊이 = $f \sin\rho\cos\beta/2$

· β : 이송에 의해 발생하는 각 = $\tan^{-1}\left(\frac{f\sin\rho}{2\pi r\cos\omega}\right)$

· Φ_N : 전단각 = $\cot\Phi\cos i - \tan\alpha_D(1-\cos i)$

· Φ : 2 차원절삭에서의 전단각 = $\frac{\pi}{4} + \frac{\alpha_D - \lambda}{2}$

· α_D : 동적 상면경사각 = $\alpha_s + \beta$

· λ : 2 차원절삭에서의 마찰각 = $\frac{\pi}{6} + \frac{\alpha_D}{2}$

· ϖ = $\sin^{-1}(B/2r)$

· δ : 비틀림각 = $\tan^{-1}(2\pi r/L)$

· η : 칩유출각 = $\tan^{-1}(\tan i\cos\alpha_D)$

· α_{DC} : chisel edg 에서의 동적 상면경사각 = $\beta - \alpha_{sc}$

· $\alpha_{sc} = \tan^{-1}(\tan\rho\sin\psi)$

최종적으로 드릴의 기하학적 형상에 의해 절삭날 부분에 작용하는 하중은 다음과 같다. 여기서 x, y, z 는 Fig. 1 에서의 좌표계를 따른다.

$$F_{xl} = F_{tl}\cos\rho + F_{cl}\cos i \quad (12)$$

$$F_{yl} = F_{cl}\cos i + P\sin i\sin\rho \quad (13)$$

$$F_{zl} = F_{tl}\sin\rho + P\cos\rho \quad (14)$$

chisel edge 에 작용하는 하중은 다음과 같다.

$$F_{xc} = F_{cc}\sin\psi \quad (15)$$

$$F_{yc} = F_{cc}\cos\psi \quad (16)$$

$$F_{zc} = F_{tc} \quad (17)$$

한 예로써, 지름 10mm, 포인트각 118°, 웹두께 1.4mm, chisel edge 각 125°, 플루트 피치 길이 50mm 의 드릴을 이송 0.5mm/rev, 회전수 300rpm 으로 구멍가공을 한다면 드릴 포인트의 절삭날(Fig. 1 의 1-4 node point)에 작용하는 힘은 Fig. 3 과 같은 분포를 보이게 된다.

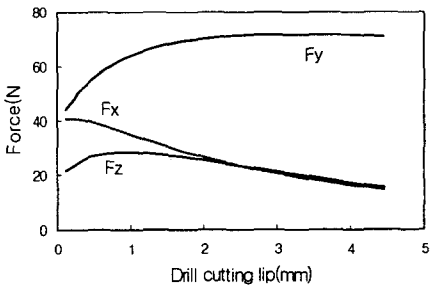


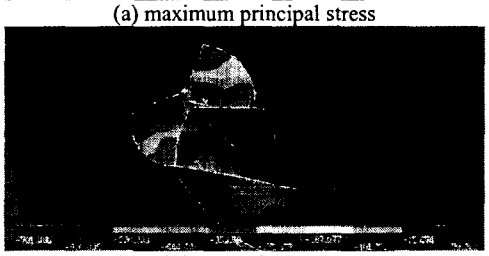
Fig. 3 Drilling force on the cutting lip

4. 해석결과 및 분석

앞절에서 언급한 3 방향의 힘을 하중조건으로 부여하고 드릴 포인트의 반대 끝단을 고정 경계조건으로 하여 유한요소해석을 수행하였다. 드릴은 일반적으로 매우 경한 재질(텅스텐 카바이드 등)로 이루어져 있으므로 해석 결과 중 주응력의 분포를 중점적으로 살펴보았다.(Fig. 4) 드릴의 절삭날 바로 아래 부분에서 최대주응력이 발생하고 절삭날과 chisel edge 부분에서 최소주응력(압축응력의 최대값)이 발생함을 알 수 있다. 즉, 절삭날 아래 부분에서는 인장에 의한, 절삭날과 chisel edge 부분에서는 압

축에 의한 파손의 가능성이 존재한다.

(a) maximum principal stress



(b) *minimum* principal stress

Fig. 4 Principal stress distribution of the drill

형상의 변화에 따른 응력분포를 살펴보는 한 예로서 web 두께를 변화시켜 보았다. Fig. 5 는 web 두께가 절삭력에 미치는 영향을 나타낸 그림이다. web 두께 변화에 따라 x, y 방향 힘은 큰 변화를 보이지 않으나 z 방향의 힘은 이송이 증가하면서 큰 영향을 받는다. 즉, 이송이 비교적 큰 경우 web 두께의 감소가 z 방향 절삭력을 크게 감소시킴을 알 수 있다. 드릴 절삭력을 하중조건으로 부여하여 드릴의 응력을 계산하였다.(Fig. 6) 이송이 10mm/rev 인 경우이며, z 방향의 힘(드러스트)이 가장 큰 힘이므로 드릴 포인트의 chisel edge 부분에서 강한 압축응력이 발생하였는데, web 두께 1.2mm 인 드릴의 경우 두께 1.4mm 인 드릴에 비해 z 방향 힘은 적게 받으나 최소주응력은(압축응력의 최대값)은 오히려 큰 값을 보이게 된다. 즉, web 의 두께를 줄임으로써 드러스트 힘은 감소되나 압축응력은 더욱 증가함을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구를 통하여 다음의 결론을 얻을 수 있다.

1. 드릴의 형상 모델링 및 유한요소메쉬 작업을,필요한 형상변수로부터 자동적으로 수행되도록 하였다.
2. 드릴 형상과 가공조건이 고려된 절삭력 모델을 이용하여, 드릴의 형상변화가 응력 및 변형에 미치는 영향을 고찰할 수 있었다.
3. 본 연구에서 수행한 방법은, 드릴 성능을 향상시킬 수 있는 공구 설계 및 가공조건 선정에 효과적으로 이용될 수 있다.

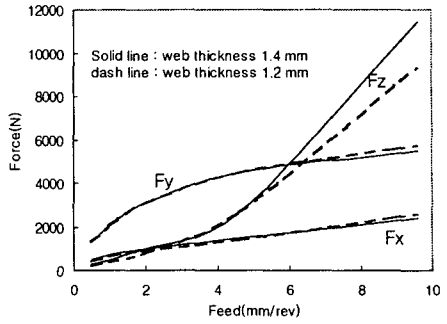
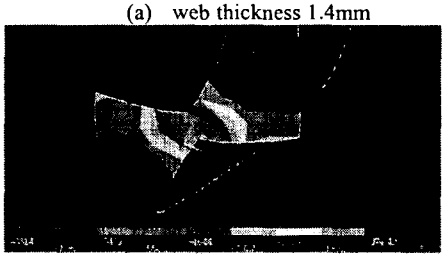


Fig. 5 Drill force with web thickness and feed variations

(a) web thickness 1.4mm



(b) web thickness 1.2mm

Fig. 6 Minimum principal stress distributions

후기

이 논문은 2000 년도 한국과학재단 목적기초연구 (R02-2000-00317) 지원으로 수행되었음

참고문헌

1. Kaldor, S., and Lenz, E., "Drill Point Geometry and Optimization," J. Eng. Ind., Trans. ASME, Vol. 104, pp. 84-90, 1982.
2. Selvam, S.V.M., and Sujatha, C., "Twist drill deformation and optimum drill geometry," Comp. Struct., Vol. 57, pp. 903-914, 1995.
3. Hinds, B.K. and Treanor, G.M., "Analysis of Stress in Micro-Drills Using the Finite Element Method," Int. J. Mach. Tools Manufac., Vol. 40, pp. 1443-1456, 2000.
4. Lee, J.W., Force Analysis of Drill Point Geometry for Optimal Design and Wear Prediction, Ph.D. Thesis U. of WI, 1986.