

이상적 속도 궤적을 이용한 드릴링 공정의 버 최소화에 관한 연구

박민석*, 전도영**

A Study on the Burr Minimization of Drilling Process by Optimal Velocity Profile Tracking

Min-Suk Park*, Do-Young Jeon**

ABSTRACT

At the exit stage of drilling, the burr generates and deburring process is required to remove it. Since the additional process reduces productivity, a burr minimization technique is necessary in the servo system of drilling machines. In this research, cutting force is modelled with tool geometry and the optimal velocity profile with which the desired cutting force maintains is generated to minimize burr. Experiments show that the proposed velocity profile tracking effectively minimizes burr compared to the constant velocity feed.

Key Words : Drilling(드릴링), Burr minimization(버 최소화), Cutting force control (절삭력 제어)

기호설명

F_{th} = thrust force of drilling process
 f = feedrate
 D = diameter of the drill
 ρ = point angle of the drill
 σ_y = yield strength of the material
 I_{rms} = root mean square of the current

1. 서론

드릴링 공정은 밀링과 함께 오늘날 가장 많은 절삭 가공중의 하나이다. 드릴링 공정에서는 피삭

재의 출구면에서 버(Burr)가 발생하게 되는데, 이 버의 제거를 위해 디버링이라는 또 다른 공정이 추가가 되고 이에 따른 시간과 비용의 손실은 엄청나다 할 수 있다. 또한 버는 부품 체결을 어렵게 함으로써 공장 자동화의 실현에도 걸림돌이 되고 있어 드릴링 공정시 버를 최소화하는 기술이 절실히 요구되고 있다.

버를 생성시키는 요인으로는 공구의 지름이나 형상과 같은 공구 기하학, 피삭재의 연성이나 강도, 드릴링 머신의 강성, 절삭유의 사용유무, 그리고 주축속도와 이송속도와 같은 절삭 조건등이 있다. 따라서 이러한 버를 최소화시키기 위하여 절삭력을 제어하거나⁽¹⁾, 드릴의 선단각(Point angle)이나 치즐각(Chisel angle)등을 변화시켜

* 서강대학교 기계공학과 대학원

** 서강대학교 기계공학과

공구의 형상을 바꾸거나⁽⁵⁾, 진동을 주어 가공하거나⁽⁶⁾, 절삭조건을 변화시키는⁽⁷⁾ 등의 여러 가지 연구들이 수행되어 왔다.

본 연구에서는 절삭면에 의해 생성되는 절삭력이 버 생성력보다 클 경우 소성변형이 피삭재의 내부에 생성되고 결국은 버가 발생하게 된다는 버 생성 이론에 기초를 두어 버가 생성되는 구간인 출구면에서 이상적인 속도 궤적을 추종하는 제어기를 설계함으로써 버의 발생을 최소화 하였다. 기존의 절삭력 제어에서 고가의 공구동력계 사용은 실제 산업현장 적용을 어렵게 만들었으나, 본 연구에서는 공구 기하학을 이용하여 절삭력을 모델링하고 절삭력과 이송속도의 관계식을 유도해 기준 속도궤적을 생성함으로써 절삭력 제어를 폐루프의 위치 제어로 구현하여 공구 동력계의 사용 없이도 절삭력 제어가 가능케 하였다.

2. 절삭력 모델링 및 속도 궤적 생성

2.1 절삭력 모델링

절삭력과 버 생성력을 모델링 하기위해 이론적 모델, M.E. Martelotti가 제시한 절삭모델, 소성 전단모델, 소성 굽힘 모델⁽¹⁻²⁾ 등 여러 가지 이론들이 제시되어 왔으나 본 연구에서는 이론적 모델⁽²⁾과 소성 굽힘 모델⁽¹⁾을 사용하였으며 사용한 드릴과 피삭재의 사양은 Table 1.과 같다.

2.1.1 이론적 모델(Theoretical Model)

드릴링시 피삭재를 뚫고 들어가는데 들어가는 힘인 추력의 크기를 예측하고 출구면에서 추력의 궤적을 구하기 위하여 다음과 같은 모델이 제시되었는데, 추력은 일반적으로 이송속도와 드릴 직경

에 비례하므로 치즐각에 의한 효과를 무시한 근사식은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{th} = K_s f \frac{D}{2} \sin\left(\frac{\rho}{2}\right) = f K_s \tan\left(\frac{\rho}{2}\right) \sin\left(\frac{\rho}{2}\right) \quad (1)$$

여기서 K_s 는 피삭재를 절삭하는데 필요한 단위 부피당 총 에너지이고, F_{th} 는 추력, f 는 이송속도, D 는 드릴의 직경, ρ 는 드릴의 선단각, 그리고 l 은 Fig. 1(a)와 같이 드릴 중심에서 한계 절삭날까지의 수직 거리, 즉 제어 대상 구간이다. 한편 Fig. 1(a)에서 단위 길이 dx 에 관한 추력은 다음과 같은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$dF_{th} = f K_s(x) \tan\left(\frac{\rho}{2}\right) \sin\left(\frac{\rho}{2}\right) dx \quad (2)$$

또한 Fig. 1(b)와 같이 서로 다른 두 개의 재질을 가진 피삭재가 붙어 있는 형태에는 식(2)를 적분함으로써 다음 식(3)과 같이 구할 수 있다.

$$F_{th}(x_b) = f \sin\left(\frac{\rho}{2}\right) \tan\left(\frac{\rho}{2}\right) \int_0^l K_s(x) dx = f \sin\left(\frac{\rho}{2}\right) \tan\left(\frac{\rho}{2}\right) [K_{s1} \int_0^{x_b} dx + K_{s2} \int_{x_b}^l dx] \quad (3)$$

이 식은 두 개의 서로 다른 재질을 가진 피삭재를 드릴이 관통할때의 추력값이며 출구면의 추력 궤적을 얻기 위해서는 K_{s2} 를 0으로 한다.

Table 1. Specification of Drill and Workpiece

Drill	Material	HSS
	Point Angle	118 °
	Helix Angle	25 °
	Chisel Angle	125 °
	Web Thickness	1.1 mm
Diameter		φ 6
Workpiece	Material	Al6061-T6
	Yield Strength	275Mpa
	UTS	310Mpa
	Size	80 × 80 × 12mm

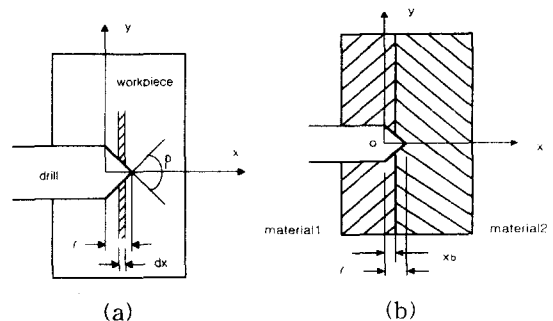


Fig. 1 Theoretical Cutting Model

2.1.2 소성 굽힘 모델 (Plastic Bending Model)

출구면에서 추력 궤적을 모델링하는 또다른 방법인 소성 굽힘 모델은 드릴링시 반계 되는 외부 하중의 비와 소모되는 에너지 비가 같다는 데서 유도될 수 있다. 먼저 외부하중의 비는 식(4)와 같이 나타낼 수 있는데

$$W_e' = \int_{r_i}^{r_o} (qdr) v(r) = qv \left(\frac{r_o - r_i}{2} \right) \quad (4)$$

여기서 Fig. 2와 같이 q는 분포하중, v는 이송속도, r₀는 드릴의 직경, r_i는 드릴 중심에서 절삭면까지의 반경이다. 한편 소모되는 에너지 비는

$$E_i' = 2\theta \frac{v}{(r_o - r_i)} [r_o M_p + M_u] \quad (5)$$

와 같고, r₀에서의 소성 굽힘 모멘트 M_p, r_i에서의 소성 굽힘 모멘트 M_u와 θ는 다음과 같다.

$$M_p = \frac{\sigma_y}{4} (r_o - r_i)^2 \cot^2 \theta \rho \quad (6)$$

$$M_u = \frac{\sigma_y}{12} (r_o - r_i)^3 \cot^2 \theta \rho \quad (7)$$

$$\theta = \cos^{-1} \frac{r_i}{r_o} \quad (8)$$

한편 식(4)와 식(5)가 같다는 조건에서 다음과 같은 추력식을 유도할 수 있다.

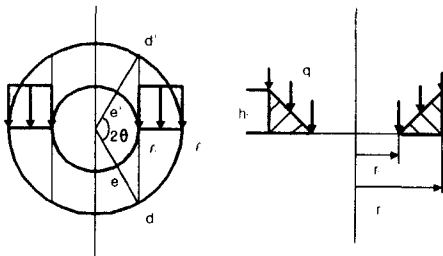
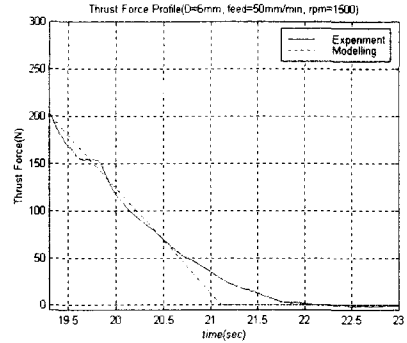
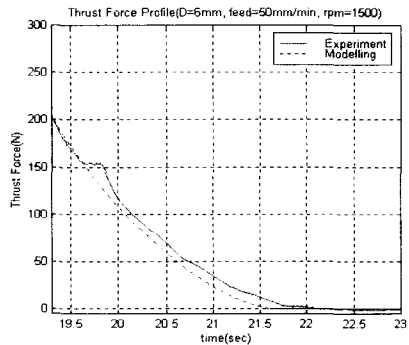


Fig. 2 Plastic Bending Model



(a) Theoretical Model



(b) Plastic Bending Model

Fig. 3 Experiment v.s. Modeling

$$F_{th} = 8\theta \frac{(r_o M_p + M_u)}{(r_o - r_i)} = \frac{2}{3} \sigma_y \cot^2 \theta \cos^{-1} \left(\frac{r_i}{r_o} \right) (r_o - r_i) (4r_o - r_i) \quad (9)$$

여기서 σ_y는 피삭재의 항복강도이며 ρ는 드릴의 선단각이다.

이렇게 유도된 추력식 식(3)과 식(9)를 이용하여 출구면에서 추력 궤적을 수치적으로 모델링 하였으며, 공구 동력계를 이용한 측정치와 모델링에 의한 수치적 예측치를 Fig. 3에 나타내어 비교하였다. 또한 사용한 드릴의 종류와 피삭재는 Table 1.과 같다.

한편 두 개의 모델 모두 실제 추력값을 잘 따라가고 있음을 보여주는데 Fig. 3(a)와 같이 이론적 모델은 선형으로써 간단한 수식에 의해 쉽게 모델을 예측할 수 있는 반면 시작에 비해 출구면

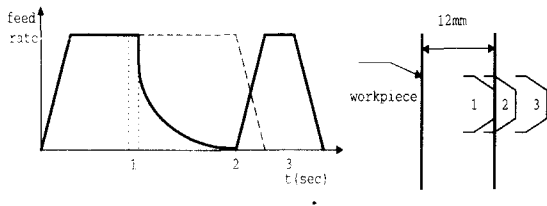
마지막 값을 제대로 따라가지 못하며, Fig. 3(b)는 소성 굽힘 모델이 비선형이므로 출구면에서 추력 궤적을 가장 잘 보여주는 모델임을 알 수 있다.

2.2 속도 궤적 생성

생성된 추력 궤적을 갖도록 기준 속도 궤적을 만들려면 추력과 이송속도와의 관계식을 유도해야 하는데 각각의 이송속도에서 추력값을 실험적으로 구하고 최소제곱 회귀분석법을 이용하여 다음과 같은 근사식을 유도하였다. 이러한 근사식은 여러 조건에서 실험적 결과에 의해 데이터 기반화 하면 실제 적용시 유용하다.

$$F_{th} = 13.5753 \times f^{0.3241} \quad (10)$$

따라서 Fig. 4(b)와 같이 출구면에서 드릴 절삭날이 피삭재를 뚫고 나가는동안 Fig. 4(a)의 실선과 같은 이상적 이송속도 궤적을 생성시켜주면 버의 크기를 최소화 할 수 있다. Fig. 4(a)의 점선은 등속인 기준 속도 궤적이며, 실선은 버 최소화를 위한 이상적 속도 궤적을 나타낸다. 이상적 속도 궤적에서 두 번째 사다리꼴은 드릴이 피삭재를 완전히 관통하게 하기 위함이다. 또한 Fig. 5는 이송속도가 50 mm/min일 때 출구면에서의 실제 이송속도값을 나타내며 Fig. 4의 1~2구간에 해당한다.



(a) Velocity Profile (b) Tool Trajectory

Fig. 4. Velocity Profile Generation

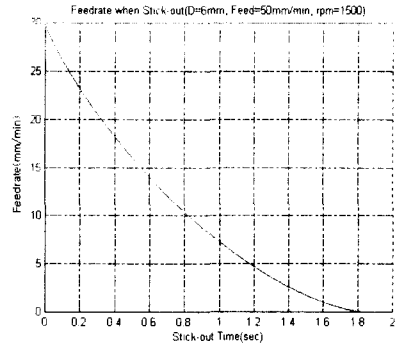


Fig. 5 Optimal Velocity Profile(Feedrate 50mm/min)

3. 출구면 감지 시스템

Fig. 4(a)를 보면 이상적 속도 궤적이 등속이 다가 출구면에서만 이송속도를 줄여주고 있는데 그러기 위해서는 드릴날이 피삭재를 뚫고 나오는 순간을 감지하는 시스템 개발이 요구된다. 물론 공구 동력계를 사용하여 절삭력을 되먹임하는 제어방식을 택해도 되겠지만 서론에서도 언급했듯이 공구 동력계는 고가의 장비이므로 실제 산업현장에의 적용이 어려우므로 홀 센서(Hall sensor)를 이용하여 z축 이송모터의 인입 전류신호를 얻고 그 신호를 분석하여 출구면을 감지하는 시스템을 개발하였다.

CNC 공작기계의 이송모터는 3상의 교류 전류가 들어오는데 이 신호를 등가의 직류 성분으로 환산하기 위해 다음과 같이 3상 전류의 자승 평균값(Root-mean Square)⁽⁴⁾을 이용하였다.

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{I_u^2 + I_v^2 + I_w^2}{3}} \quad (11)$$

$$I_u = I \cdot \sin \theta \quad (12)$$

$$I_v = I \cdot \sin \left(\theta - \frac{2}{3} \pi \right) \quad (13)$$

$$I_w = I \cdot \sin \left(\theta + \frac{2}{3} \pi \right) \quad (14)$$

Fig. 6은 공구 동력계로 측정된 절삭력값과 홀 센서로 측정된 전류의 자승 평균값을 같이 보여주는데 실제 절삭력의 변화에 따라 전류값이 민감하게 반응하는 것을 볼 수 있다. 전류의 자승 평균

값에 남아있는 사인파형은 3상 전류 각각의 측정 시 존재하는 초기 윗셋량과 일정치 않은 전류 신호의 크기 때문이며 정확한 출구면 감지를 위하여 이 신호의 최대, 최소값, 주기, 위상차등으로부터 등가의 사인파형을 생성 시켜주고, 그 두 신호의 차를 오차로 하는 알고리즘을 적용하였다.

Fig. 7의 출구면 감지 알고리즘은 처음에는 등속 이송속도 제어를 수행하다가 출구면이 감지가 되면 기존의 등속 이송속도 제어 루프를 빠져나와 기준 속도 궤적을 따라 절삭력을 추종하는 제어 루프를 수행하게 되어있다.

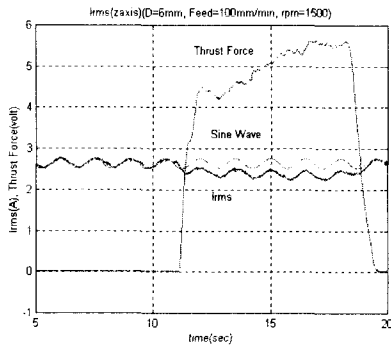


Fig. 6 I_{rms}(A) v.s. Thrust Force(volt)

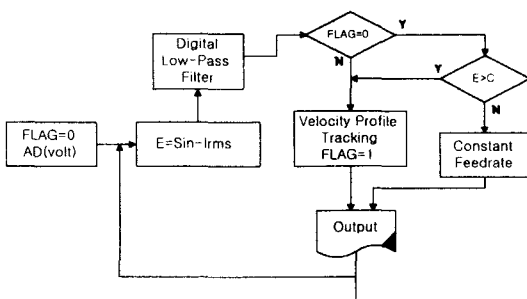


Fig. 7 Algorithm for exit stage detecting

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 실험장치 및 사양

실험에 사용된 장치는 대우중공업(주)의 수직형 머시닝 센터(ACE-V30)이고 x, y, z축의 이송 모터는 한국산전의 AC 서보 모터이다. z축 방향의 절삭력 측정을 위하여 KISTLER사의 공구 동력계(9257B)를 테이블에 장착하였으며 절삭시 진동등으로 발생한 고주파의 잡음(noise)을 제거하기 위하여 차단 주파수가 10Hz인 디지털 필터를 사용하였다. 또한 z축 이송모터의 3상 교류 전류 신호를 얻기 위한 홀 센서로서는 HP사의 AC/DC current probe가 사용되었으며 이들을 이용하여 전류와 절삭력 신호간의 관계를 파악하였다.

한편 속도 제어 알고리즘을 머시닝 센터에 적용하기 위하여 TMS320C40 DSP보드를 사용하였으며 z축의 위치를 얻기 위해 dSPACE사의 DS3001 엔코더 보드를, AD, DA, 그리고 DIO를 위해 멀티 IO보드인 DS2001보드를 사용하였다.

4.2 실험 결과

버의 종류는 그 모양, 생성 위치 그리고 생성 원인등에 따라 여러 가지로 분류할 수 있는데, 버의 모양을 기준으로 Uniform burr, Cap burr, Petal burr⁽⁷⁾로 나눌 수 있다. Uniform burr는 일정한 크기를 가지는 버로써 그 크기를 쉽게 말할 수 있으며 Table 2.에 수치로 나와있는 모든 버를 말하며 가장 좋은 형태의 버이다. 한편 Cap burr는 모자 모양의 버가 떨어지지 않고 남아있는 형태를 말하며 Petal burr는 Cap burr가 찢어져 나팔꽃 모양의 형태를 취하게 되며 이 두가지 형태의 버는 모두 디버링시 더 많은 시간과 비용이 든다.

위와 같이 구성된 실험장치로 이송속도는 50mm/min이고 주축속도는 1500rpm일 때 서로 재질과 형상이 다른 세가지 공구를 사용하여 두께가 12mm인 Al6061-T6를 드릴링하였으며 그 결과는 Table 2.에 나타내었다. 여기서 버의 크기는 세 번 이상 실험하여 공구 현미경으로 측정된 뒤 평균을 구한 값이다. 실험 결과는 기존의 등속 이송속도 제어기에 의한 수 mm되는 버의 크기를 이상적 속도 궤적 추종 제어로써 수백 마이크로미터 수준으로 줄일 수 있음을 보이고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 드릴링 공정시 출구면에서 생성되는 버의 크기를 최소화하기 위해 이상적 속도 궤적을 추종하는 제어를 설계하였으며 실험 결과로부터 다음과 같은 결론을 내렸다.

공구 기하학과 기존에 제시된 절삭력 모델을 사용하여 절삭력을 적절히 예측하는 모델링을 할 수 있었고 절삭력과 이송속도 관계함수를 실험적으로 유도해 속도 궤적 생성에 이용하였다. 또한 버 최소화를 위한 이상적 속도 궤적을 생성하고 홀 센서를 사용하여 출구면을 감지하는 알고리즘을 적용함으로써 고가의 공구 동력계의 사용없이 버의 크기를 효과적으로 줄였다.

4. 김기대, 최영준, 오영탁, 주종남, "머시닝센터에서 이송전류신호를 이용한 이송계의 바질특성 규명과 이를 고려한 절삭력의 간접측정," 한국정밀공학회 14(4), pp. 78-87, 1997.
5. 김진호, "Valve Housing Deburring에 대한 연구," 정밀표면가공 및 디버링 기술 워크샵, pp. 74-88, 1998.
6. K. Adachi, "A Study on Burr in Low Frequency Vibratory Drilling," Bull. Japan Soc. of Prec. Eng., Vol. 21, No. 4, pp. 258-264, 1987.
7. 최종순, 권상호, 박동삼, "Al6061판재의 미소 드릴링시 버 형성에 관한 연구," 한국정밀공학회 '98년도 춘계학술대회 논문집, pp. 891-895, 1998.

Table 2. Comparison of burr size

공구 재질	선단각	절삭유	제어방식	버 크기(mm)
고속도강	118 °	ON	CFC	1.981
			VPTC	0.217
		OFF	CFC	2.130
			VPTC	0.517
코발트	138 °	ON	CFC	Cap Burr
			VPTC	0.204
		OFF	CFC	Cap Burr
			VPTC	0.491
초경	120 °	ON	CFC	Cap Burr
			VPTC	0.142
		OFF	CFC	Cap Burr
			VPTC	2.011

*CFC - Constant Feedrate Controller
 VPTC - Velocity Profile Tracking Controller

참고문헌

1. G. Lee, Digital Control for Burr Minimization in Drilling, Ph. D Dissertation, UC Berkeley, 1989.
2. B. Allotta, "A hand-held drilling tool for orthopedic surgery," IEEE/ASME transactions of mechatronics, Vol. 2, No. 4, pp. 218-228, 1997.
3. S. Ko and D. Dornfeld, "Analysis of fracture in burr formation at the exit stage of metal cutting," J. of materials processing technology, Vol. 58, pp. 189-200, 1996.