

톱절삭에서의 절삭력 예측

Estimation of cutting forces in band sawing

정 훈 (영남대 대학원), 백 대균 (영남대 공대), 고 태조 (영남대 공대), 김 희술 (영남대 공대)

Hoon Jeong (Yeungnam Graduate School, Yeungnam Univ.), Dae kyun Baek (Yeungnam Univ.), Tae Jo Ko (Yeungnam Univ.) Hee Sool Kim (Yeungnam Univ.)

ABSTRACT

The cross section of the circular rod type workpiece to be cut in the band saw machine is variable at every moment in the sawing process. When the cutting feed rate is fixed to the constant speed, the cutting edges of the band saw teeth are also variable at any moment, so this causes the wear of the band saw teeth and the deterioration of the quality in the surface roughness.

In this study, to work out this kind of problem basically, the mean cutting force of a tooth in the band saw was estimated by using the workpiece which was smaller than the interval of each tooth, i.e. band saw pitch, in the thickness. Then the static cutting forces were predicted by applying the mean cutting forces referred above to the mechanistic cutting force model which were analyzed through the geometric profile of a band saw tooth.

1. 서론

톱 기계는 원 소재를 절단하는 가공에 있어서 가장 많이 사용하는 공작기계이다. 톱 기계의 종류로서는 톱날이 전,후 운동을 하며 절단하는 Reciprocating saw (Hack saw), 톱날이 띠 형태를 구성하여 절삭하는 Vertical or Horizontal band saw 와 톱날이 얇고 둥근 wheel의 형태로 되어서 이 wheel이 회전하면서 절단하는 Circular saw등이 있다. 그 중에서도 kerf 손실이 제일 작고, 절입이송 속도를 다양하게 변화시키는데 용이하며, 다른 톱 기계에 비하여 큰 소재를 자를 수 있다는 장점때문에 band saw를 일반적으로 많이 사용한다.

보통 톱 기계의 일반적인 문제점은 톱의 Blade가 카우로 진동하는 일종의 String Vibration현상과 환봉형태의 소재와 같이 절단 단면적이 변하는 경우 절입이송량이 일정한 톱에 있어서는 톱날에 걸리는 절삭력이 매 순간마다 변하게 되어서 톱날마모와 표면조도가 나빠지게 되는 현상이 일어난다.

이러한 톱기계가 갖고 있는 문제점을 해결하기 위해서는 기본적으로 절삭력 예측이 필요하다. 일반적으로 절삭력 예측에 관한 연구는 1873년경 프랑스의 과학자 Tresca로부터 시작된 것으로 알려져 왔으

며, 1940년초 Merchant가 2차원 절삭과정의 절삭력을 해석적으로 접근함으로써 절삭역학이 학문적으로 대두되게 되었다.[1] 그리고 절삭력에 대한 3차원적인 해석은 1950년대초 Show 및 Cook에 의해 시도 되었으며[2] 그 이후 변형률 속도를 고려한 소성이론의 적용, 미끄럼선상장법, 유동 응력 특성등을 이용하여 3차원 절삭을 해석하여 왔다. 한편, Martellotti[3]는 제시한 변형을 일으키기 전의 칩 단면적과 절삭력간에는 어떤 비례관계가 성립하고, 이 비례상수를 비절삭저항(Specific Cutting Pressure)으로 하여 절삭력을 예측하는 방법을 제시하였다.

상기의 연구와 같이 다양한 절삭력 연구에도 불구하고 톱날에 걸리는 절삭력의 해석에 관한 연구는 거의 없다. 이러한 연구중 Sarwar[4]는 single band saw tooth로 선반에서 절삭력을 측정하였고, Henderer[5]는 Merchant의 Orthogonal cutting을 이용하여 소재, 이송속도,절삭속도와 같은 Parameter에 대한 톱에 미치는 합력(Resultant force)의 민감성 및 크기를 연구하였다. 그러나 이러한 연구는 아직까지 톱기계에서 한 이빨에 대한 절삭력을 제시하고 있지 못하고 있는 상태이다.

본 연구에서 사용된 절삭력 예측방법은 Martellotti가 제시한 변형을 일으키기 전의 칩단면적과 절삭력

간의 비례상수를 Mechanistic 모델과 병합하여 한 이빨에 대한 절삭력을 예측하였다. 본 연구의 톱의 정절삭력 예측은 톱날에 걸리는 절삭력을 미리 알아냄으로써 환봉과 같이 절단 단면적이 변하는 경우 절입이송속도를 제어하는데 큰 도움이 될 것으로 생각되며, 절입이송속도제어에 의해 파생되는 절단단면의 표면조도나 최적절삭조건 찾는 데 아주 용이할 것으로 사료된다.

2. 이론 해석

2.1 절삭력 모델

Band saw의 톱날은 Fig.1과 같이 3차원 절삭모델로 모델링할 수가 있다. 따라서 톱의 3차원 절삭가공시 발생하는 절삭력은 공구와 공작물간의 기하학적 형상에 의해 미변형 칩단면적(Uncut chip area)을 계산하여 실험적인 방법에 의해서 결정된 비절삭저항과의 곱으로 구할 수 있다. 그리고 톱의 X방향의 절삭력성분은 X방향의 미변형 칩단면적과 X방향의 비절삭저항의 곱으로 낼 수 있고, Y, Z방향의 절삭력은 X방향의 절삭력성분에 일정비로서 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F_x(i) &= K_s * A(i) \\ F_y(i) &= K_y * F_x(i) = K_y * K_s * A(i) \\ F_z(i) &= K_z * F_x(i) = K_z * K_s * A(i) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, K_s 는 비절삭저항, K_y 는 Y방향 비례상수, K_z 는 Z방향 비례상수이다.

2.1.1 톱의 형상

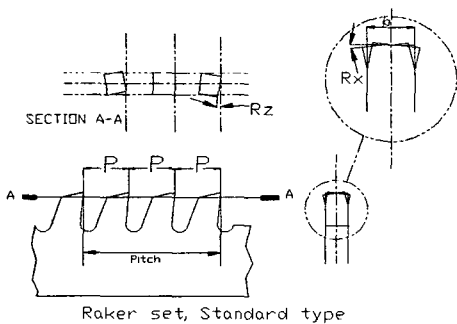


Fig.1 Geometry of saw blade

톱니의 모양에는 Standard, Skip, Hook 모양이 있

으며, 본 연구에서는 원활한 마무리작업에 용이한 Standard 모양을 사용하였다. 또, 톱은 각 측면에 Offset을 주는 형태로서 구분되는데 종류는 Raker set, Straight set, Wave set가 있으며, 본 논문에서 사용된 set은 일반적으로 많이 사용하는 Raker set이다. 1인치 내의 이빨수를 Pitch라고 정의하며, 본 연구에 사용한 톱날은 1 inch에 3개의 이빨이 있고, Raker set, Standard type을 Fig.1에 잘 나타내고 있다.

2.1.2 미 변형 칩 단면적

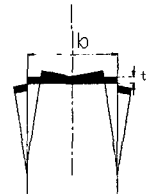


Fig 2. Uncut chip area

Fig.2는 톱이 절삭할때 한 set 내의 이빨에 대한 Uncut chip area(빗금친 부분)을 나타내고있다. 여기서 b 는 chip width이고, 그때의 한 이빨당 이송(ti)은 다음과 같이 된다.

$$ti = \frac{bf}{v}$$

b = 이빨사이의 간격, f = blade의 이송속도, v = blade의 절삭속도이다.

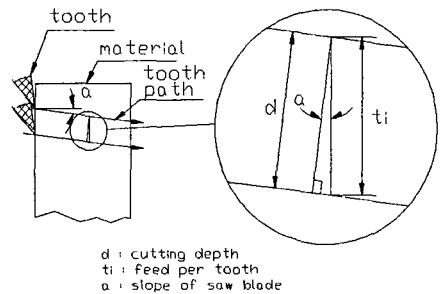


Fig. 3 Cutting depth

Fig 3은 띠톱이 기울어진 각도(a)로 인하여 한 이빨당 이송과 실제의 절삭깊이를 표현하고 있다. 그러나 이 각도(a)가 아주 작은 값이므로 절삭깊이

는

$$d \approx ti$$

라고 할 수 있고, 따라서 미변형 칩단면적은

$$A = b \times ti$$

가 된다.

2.2 비절삭저항

비절삭저항(K_s)은 실험에서 얻어진 X방향의 한 이빨에 대한 평균절삭력을 미변형 칩단면적으로 나누어서 구해질 수 있고, Y,Z방향의 비례상수 K_y, K_z 는 X방향의 평균절삭력으로 나누어서 다음의 식과 같이 구해질 수 있다.

$$K_s = \frac{\overline{FX}}{A}$$

$$K_y = \frac{\overline{FY}}{\overline{FX}}$$

$$K_z = \frac{\overline{FZ}}{\overline{FX}}$$

여기서, $\overline{FX}, \overline{FY}, \overline{FZ}$ 는 X, Y, Z방향의 평균절삭력이고, A는 미변형 칩단면적이다.

2.3 기하학적 형상에 의한 절삭력 모델

Raker set 형태는 똑바른 날과 좌,우측으로 틀어진 날이 반복적으로 되어 있으며, 그때 인선에 걸리는 절삭력을 기하학적 형상에 의해 모델링해보면 아래의 Fig4, Fig5, Fig6과 같이 표현되어 진다.

2.3.1 i-1번째 좌측으로 틀어진 날의 절삭력 모델

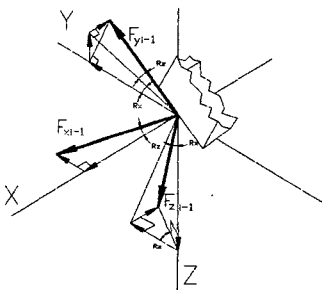


Fig.4 Tooth shaped to the left

Fig.4와 같은 기하학적 형상에 대하여 이빨에 걸리는 절삭력, 추력을 X, Y, Z방향으로 나타내면,

$$\begin{aligned} FX(i-1) &= Fx(i-1) \cos r_z \\ &\quad - Fy(i-1) \sin r_z \\ &\quad - Fz(i-1) \sin r_x \sin r_z \\ FY(i-1) &= Fx(i-1) \sin r_z \\ &\quad + Fy(i-1) \cos r_x \cos r_z \\ &\quad + Fz(i-1) \sin r_x \cos r_z \\ FZ(i-1) &= -Fy(i-1) \sin r_x \cos r_z \\ &\quad + Fz(i-1) \cos r_x \end{aligned} \quad (2)$$

식(1)을 식(2)에 대입하면,

$$\begin{aligned} FX(i-1) &= K_s * b * A [\cos r_z - K_y \sin r_z \\ &\quad - K_z \sin r_x \sin r_z] \\ FY(i-1) &= K_s * b * A [\sin r_z + K_y \cos r_x \\ &\quad \cos r_z + K_z \sin r_x \cos r_z] \\ FZ(i-1) &= K_s * b * A [-K_y \sin r_x \cos r_z \\ &\quad + K_z \cos r_x] \end{aligned}$$

이 된다. 여기서 r_x 는 X축에 대하여 회전한 각도, r_z 는 Z축에 대하여 회전한 각도이다.

2.3.2 i번째의 똑바른날의 절삭력모델

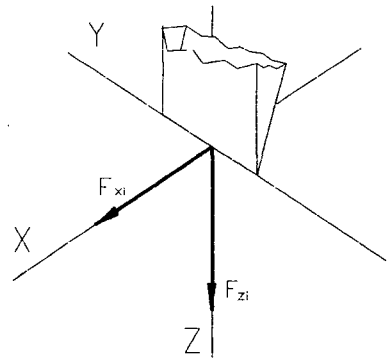


Fig 5. Tooth shaped to the straight

식(2)와 마찬가지로 똑바른 날에 대하여 절삭력을 모델링해보면,

$$\begin{aligned} FX(i) &= Fx(i) \\ FY(i) &= 0 \\ FZ(i) &= Fz(i) \end{aligned} \quad (3)$$

식(1)을 식(3)에 대입하면,

$$\begin{aligned} FX(i) &= K_s * b * A \\ FY(i) &= 0 \\ FZ(i) &= K_y * K_s * b * A \end{aligned}$$

이 된다. 이 경우 측면으로 작용하는 추력은 전형적인 Orthogonal cutting과 같이 무시가능하다.

2.3.3 i+1번째 우측으로 틀어진 날의 절삭력 모델

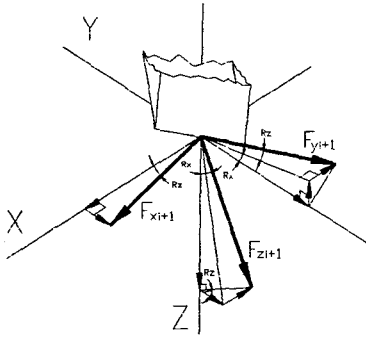


Fig. 6 Tooth shaped to the right

좌측으로 틀어진 날과 마찬가지로 우측으로 틀어진 날의 경우는

$$\begin{aligned}
 FX(i+1) &= Fx(i+1) \cos r_z \\
 &\quad - Fy(i+1) \sin r_z \\
 &\quad - Fz(i+1) \sin r_x \sin r_z \\
 FY(i+1) &= -Fx(i+1) \sin r_z \\
 &\quad - Fy(i+1) \cos r_x \cos r_z \\
 &\quad - Fz(i+1) \sin r_x \cos r_z \\
 FZ(i+1) &= -Fy(i+1) \sin r_x \cos r_z \\
 &\quad + Fz(i+1) \cos r_x
 \end{aligned} \quad \text{--- (4)}$$

식(1)을 식(4)에 대입하면,

$$\begin{aligned}
 FX(i+1) &= K_s * b * A [\cos r_z - K_y \sin r_z \\
 &\quad - K_z \sin r_x \sin r_z] \\
 FY(i+1) &= K_s * b * A [-\sin r_z - K_y \cos r_x \\
 &\quad \cos r_z - K_z \sin r_x \cos r_z] \\
 FZ(i+1) &= K_s * b * A [-K_y \sin r_x \cos r_z \\
 &\quad + K_z \cos r_x]
 \end{aligned}$$

이 된다.

3. 실험 장치 및 방법

본 실험에 사용된 톱 기계는 Horizontal band sawing M/C(KDBS 450A : (주) 경동기계)이고, 실험장치의 개략도는 Fig.7과 같다. 본 연구에 사용된 톱은 STARRETT 회사의 BEARCAT 톱니형상, Regular pitch, Raker set type을 사용하였다. 톱 기계의 base위에 3축방향의 절삭력을 측정할 수 있는 압전식 형태(piezo electricity type)의 절삭력 센서인 공기동력계(KISTLER type 9257A)를 부착하고, 공기동력계위에 공작물을 장착할 수 있는 치구를 설치하였다. 이 치구에는 두께가 8mm인 소재가 놓여져 있다. 여기서 8mm의 소재두께를 선택한 이유는 톱

니간의 거리가 8.3mm이므로 절삭할때 한 이빨에 해당하는 평균 절삭력을 측정하기 쉽고, 한 이빨에 대한 평균절삭력을 이용하여 비절삭저항을 구하는데 용이하다. Sarwar는 톱의 Single band saw tooth[4]로 선반에서 한 이빨에 대한 평균절삭력을 구한데 반해 본 연구는 톱 기계에서 바로 절삭력을 측정하였다. 절삭과정중에 공기동력계로 부터 나온 신호는 Charge amplifier에서 증폭된 후에 A/D 변환기를 거쳐서 피스널 컴퓨터에 저장되도록 하였다. 실험에 사용된 실험조건은 Table 1에 나타내었다.

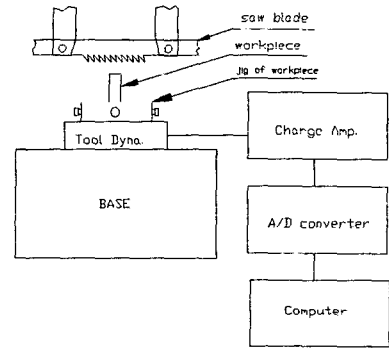


Fig. 7 Experimental set up

Table 1 Experimental conditions

Cutting Speed(m/min)	30, 48
Feed Rate(mm/min)	15, 40, 84, 189
X축에 대한 회전각(r_x)	5°
Z축에 대한 회전각(r_z)	6°
saw blade(mm)	4670×38×1.3
sampling frequency(Hz)	1000
No. of data	1024
workpiece	SS41C

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 절삭력에측에 있어서 정절삭력만 예측하였다. Fig. 8에 나타난 그래프는 이송속도가 84 mm/min이고 절삭속도가 30 m/min일때 실제 절삭력과 simulation 절삭력을 동시에 그려놓은 그림이다. 절삭력은 FX가 100(N)으로서 주로 많은 부하가 걸리고 있고, Z방향의 절삭력은 X방향의 절삭력의 약 2/5배정도가 됨을 보여 준다. 이것은 통상 Fc(Cutting force)와 Ft(Thrust force)가 1대 0.4정도

가 되며 본 연구에서도 F_c 에 해당하는 절삭력 F_X 와 F_t 에 해당하는 절삭력 F_Z 가 대략 1대 0.4임을 보여주고 있다. Y방향의 절삭력은 X,Z에 비하여 아주 작은 값을 나타내고 있고, 한 톱니의 절삭력임을 잘 인식하기 어려울 정도로 oscillation이 나타난다. 이것은 Y방향의 절삭력이 절삭하는데 있어서 큰 영향을 주지 않는 것을 입증해 주고 있으며, saw blade의 절삭방향에 좌,우로 떠는 String Vibration이 Y방향 절삭력에 크게 영향을 미치는 정적인 요소보다 동적인 요소가 크게 작용함을 알 수 있다.

Simulation한 절삭력이 실험에서 얻어진 절삭력과 정확하게 일치하지 않는 것은 동 절삭력 성분 뿐만 아니라, saw blade를 구동시키는 두 개의 saw wheel이 정확한 진원도가 나오지 않기때문에 나타나는 것으로 사료된다.

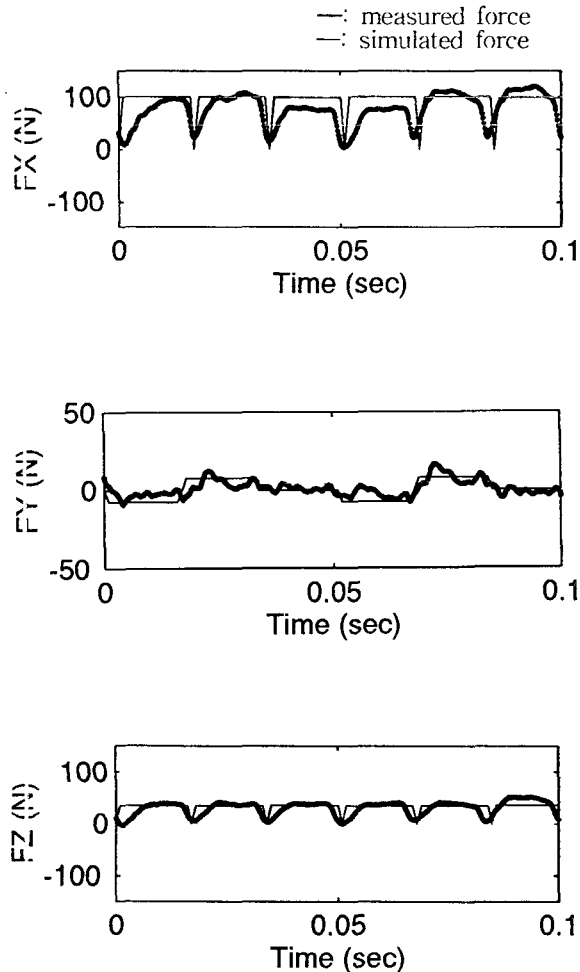


Fig 8. Predicted and measured cutting forces ; feed rate=84 (mm/min), cutting speed= 30(m/min)

5. 결론

본 연구에서 톱니의 절삭력 모델을 개발하여 simulation한 절삭력과 실험을 통해서 얻은 결론은 다음과 같다.

1. Reker set style의 톱니에 대한 절삭력 모델을 개발하였다.
2. 이 모델을 통한 정 절삭력과 측정을 통한 절삭력이 잘 일치하므로 절삭력 모델이 타당함을 보여주고 있다.
3. 추후에 동 절삭력 모델을 개발하여 본 연구에 더 참가함으로써 소재의 표면조도 및 톱날의 공구마모를 예측하는데에 기본적인 자료가 될 수 있으며 이로 인한 공구의 개발에 도움이 될것으로 생각된다.

후기

이 연구는 1996년도 한국과학재단 산학협력연구 연구비지원에 의한 결과이며, 본 연구를 위해 장비를 기증한 (주)경동기계 이 현우 사장님께 감사드립니다.

참고문헌

1. Merchant, M.E., "Analysis of the Milling Process, Part-Down Milling", Trans. ASME, Vol.67, pp67, 1941
2. Show, M.C., Cook, N.H., and Finne, I. "The Shear-Angle Relationship in Metal Cutting", Trans. ASME, Vol.75, pp. 273-288, 1953.
3. Matelloti, M.E., "An Analysis of the Milling Process", Trans. ASME, Vol.63, pp.151-152, 1974.
4. Sarwar, M., S.R. Bradbury, and M. Dinsdale, (1988), "An Approach to Computer Aided Bandsaw Teeth Testing and Design", Proceedings of the Fourth National Conference on Production Research, pp.494-501
5. W.E. Henderer, Jonathan D. Boor, James R. Holston, "Estimation of cutting forces in band sawing metals", Trans. NAMRC. Vol.24, 1996.