

톱기계에서 절삭력 예측을 위한 역학모델

정 훈*, 고 태 조**, 김 희 술**

A Mechanistic Model for the Prediction of Cutting Forces in Band Sawing

Hoon Jeong*, Tae Jo Ko**, Hee Sool Kim**

ABSTRACT

In this research, in order to predict the cutting force using a mechanistic model, specific cutting force was firstly obtained through the cutting experiments. Band sawing process is similar to a milling, that is multi-point cutting. Therefore it is not easy matter to evaluate specific cutting force. Thus, the thickness of workpiec was made smaller than one pitch of the saw in terms of fly cutting in the face milling process. Then the cutting force was predicted by analyzing the geometric shape of a saw tooth. The tooth shape used in the research was raker set style that was generally used in band sawing. And a set of teeth is comprised of three teeth, those are ranked as left, straight and right. The mechanistic model was developed in this study considered those shapes of each tooth. From the validation experiments, the predicted cutting forces coincided well with the measured ones. Therefore the predicted cutting forces can be used for the adaptive control of saw engaging feed rate in the band sawing .

Key Words : Band sawing machine(띠톱기계), Cutting force(절삭력), Prediction(예측), Mechanistic model(역학모델), Multipoint cutting(다인절삭), Saw balde(톱날), Saw tooth(톱니)

1. 서 론

톱절단은 금속부품의 제작에 있어서 재료의 절단에 사용하는 1차적인 가공방법이다. 톱절단에 사용하는 톱기계는 톱날이 전후 왕복운동을 하면서 절단하는 활톱(hacksaw), 둥근 띠형상으로 만든 톱날을 수직 또는 수평방향으로 무한히 회전시키는 수직 또는 수평 띠톱(band saw), 그리고 톱날이 얇고 둥근 휠의 형태로 되어 있는 둥근 톱(circular saw) 등이 있다⁽¹⁾. 이 중에서 절

단폭(Kerf)이 가장 적어서 재료의 손실이 적으며, 톱날의 절삭속도를 다양하게 변화시킬 수가 있고, 비교적 큰 소재를 절단할 수 있다는 장점 때문에 띠톱(band saw)이 가장 많이 사용되고 있다.

일반적으로 톱절단을 할 때는 단면적이 일정한 사각형의 재료보다는 반경방향으로 절단이 되면서 단면적의 변화가 발생하는 원형의 재료가 많이 절단된다. 이러한 경우 톱날의 절입이송속도를 일정하게 하면 절단 톱니에 부하가 많이 걸리게 되면서 절단시에 많은 진동이 발생한

* 영남대학교 대학원 기계공학과
** 영남대학교 기계공학부, 정회원

다. 또한 진동으로 인하여 절단폭이 넓어지고, 톱니의 손모가 빨리 일어나며, 절단면이 거칠어짐과 동시에 절단한 소재의 절단치수가 나빠지게 된다. 이러한 의미에서 Ulsoy는 넓은 폭의 띠톱날에 대하여 회전 운동시 발생하는 횡진동을 Hamilton의 원리로 모델링하고, 유한요소법과 Ritz법을 이용하여 운동방정식의 해를 구하여 띠톱의 동적거동을 파악하였다⁽²⁾. 한편 Carlin 등은 둥근 톱날에서 초기장력과 반경방향으로 평면응력이 집중된 휠에 대하여 에너지법을 이용하여 톱의 거동을 해석하기도 하였다⁽³⁾. 또한 Sarwar 등은 톱절단시 발생하는 톱니의 치핑^(4,5), 절삭력과 마찰특성⁽⁶⁾, 톱날의 성능에 영향을 미치는 파라메터들⁽⁷⁾에 관하여 연구를 하면서 톱날의 성능향상에 대하여 많은 연구를 하였다.

상기와 같은 연구들의 가장 기본은 절단시 발생하는 절삭력의 측정과 절삭력의 예측이다. 그러나 톱기계는 선삭과 달리 다인절삭이고, 톱니의 형태가 각각 좌우로 비틀어져 있어서 형상이 다르기 때문에 절삭력의 예측이 어렵다. 이러한 이유때문에 Sarwar는 유한요소해석과 선삭을 이용한 다인절삭기술을 도입하여 절삭력을 해석하였으며⁽⁸⁾, Henderer 등은 해석적인 방법으로 2차원 절삭에 대하여 절삭력을 예측하는 방법에 대하여 발표하였다⁽⁹⁾. 그러나 이러한 방법은 2차원 절삭이며, 미리 절삭 전단각도를 알아야 하고, 정적 절삭력 만을 제공함으로써 진동의 해석 등에 필요한 다인절단에서의 동적 절삭력 예측이 불가능하다는 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 다인절삭을 하는 톱절단에 있어서 동적인 절삭력을 예측하는 역학모델을 개발하고자 한다. 절삭력을 역학적으로 예측하는 방법은 다인절삭인 밀링에서 절삭날의 경로와 순간 미변형 칩두께 등을 이용하는 방법을 Martellotti가 발표하면서 널리 사용되게 되었다⁽¹⁰⁻¹¹⁾. 이러한 연구는 Koenigsberger와 Sabberwal 등에 의하여 계속되었으며 이들은 슬래브와 정면밀링과정에서 접선력을 분석하여 비절삭저항은 공작물 재질, 공구의 형상, 비틀림각, 칩 단면적에 관계없이 순간 칩두께의 함수임을 나타내었다⁽¹²⁾. 이러한 모델들은 모두 단순화시킨 절삭과정에 대한 모델로서, Kline과 DeVor는 다양한 절삭환경에도 적용가능한 절삭력 예측모델을 엔드밀링 공정에 대하여 개발하였으며⁽¹³⁾, Fu 등은 정면밀링에 대하여 일반화된 접근 모델을 제안하였다⁽¹⁴⁾.

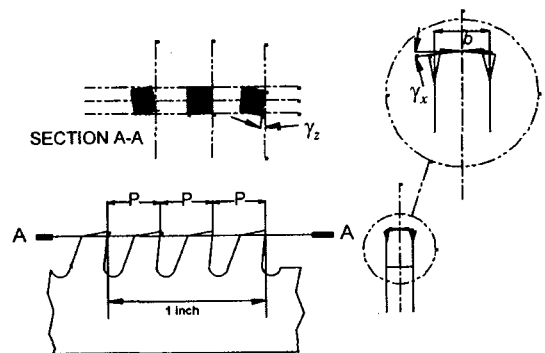
본 연구에서는 동적 절삭력을 예측하기 위하여 Martellotti가 제안한 모델과 같이 미변형 칩단면적과 비절삭저항값을 이용하는 절삭력모델을 사용한다. 이를 위

해서는 비절삭저항값을 모델링하는 것이 필요한데 본 연구에서는 소재의 폭을 절단 톱니 사이의 간격보다 작게 하여 마치 정면밀링에서의 플라이 절삭(fly-cutting)이 될 수 있도록 다인절삭기법을 도입하였다. 이 값을 좌굴 절 톱니(left bent saw tooth), 직선 톱니(straight saw tooth), 우굴절 톱니(right bent saw tooth)에 대하여 각각 대입하여 연속절삭에 대한 절삭력값을 예측하여 낼 수가 있었다.

2. 미변형 칩두께

2.1 톱날의 형상

톱니의 모양에는 칩을 원활하게 배출하도록 하기 위하여 홈(gullet)을 만드는데 여기에는 표준형, skip형, hook형이 있으며, 본 연구에서는 마무리작업에 용이한 표준형을 사용하였다⁽¹⁾. 또한, 톱은 양측면으로 톱니를 기울여서 오프셋을 주는데 이는 톱날과 피삭소재가 끼이는 것을 방지하는 역할을 한다. 이것을 세트라고 하며, 이들의 종류는 raker set, straight set, wave set이 있다. 본 논문에 사용된 세트는 일반적으로 많이 사용하는 raker set이다. 그리고 1인치 내의 톱니수를 피치라고 정의한다. 본 연구에 사용한 톱날은 1 inch에 3개의 톱니가 있고 raker set이며 표준형 홈을 가진 톱날로서, Fig. 1은 본 연구에 사용된 톱날의 모양이다.



Raker set, standard type (3TPI)

Fig. 1 Geometry of saw blade

2.2 미변형 칩두께

Fig. 2(a)는 톱날이 소재를 절단할 때의 절삭기구를 나타낸 그림이다. 밴드소잉에서는 절삭깊이는 날당 절입이 송과 방향이 같기 때문에 동일한 값이다. 그리고 톱날에

서 절삭깊이는 절입이송속도와 절삭속도에 따라서 변하게 된다. 따라서 톱니 한 날당 절입이송 t_i 는 다음과 같이 된다.

$$t_i = \frac{p \cdot f}{v} \quad (1)$$

여기서 p 는 톱날의 톱니간격, f 는 톱날의 절입이송속도, v 는 톱날의 절삭속도이다.

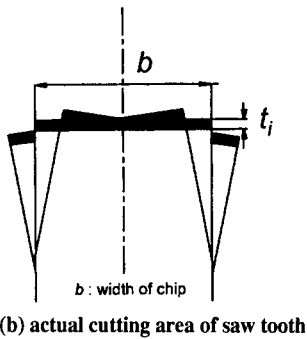
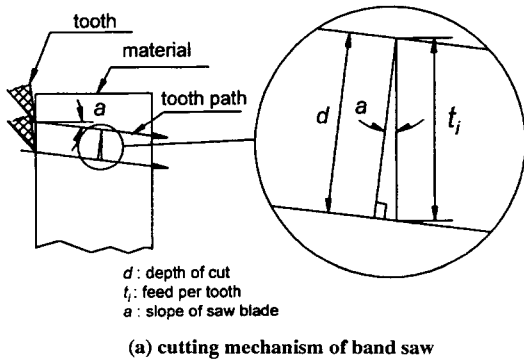


Fig. 2 Cutting mechanism of band sawing

Fig. 2(a)에서 보이듯이 띠톱은 절단을 효율적으로 이루어지도록 각도 a 만큼 기울어져 있다. 그러나 이 각도는 아주 작은 값이어서 실제 절삭깊이 d 는

$$d \approx t_i \quad (2)$$

라고 할 수 있다. 따라서 미변형 칩단면적은 Fig. 2(b)에서 볼 수 있듯이 b 를 칩의 폭이라고 할 때 식 (3)과 같이 된다.

$$A = b \times t_i \quad (3)$$

3. 절삭력 모델

3.1 비절삭저항

Martellotti는 칩 단면적에 작용하는 법선력은 미변형 칩단면적과 비절삭저항의 곱으로 표현할 수 있다고 제안하였다. 이 모델을 이용하면 Fig. 3에서와 같이 3차원 톱 절삭력 모델에서는 X 방향, 즉 절삭속도 방향이 법선력이 된다. 따라서 비절삭저항 K_s 는 실험에서 얻어진 X 방향의 한 톱니에 대한 평균절삭력을 미변형 칩단면적 A 로 나눔으로서 구해질 수 있고, Y, Z 방향의 비절삭계수 K_y, K_z 는 X 방향의 평균절삭력으로 나누어서 식 (4)와 같이 구할 수가 있다.

$$\begin{aligned} K_s &= \frac{\overline{FX}}{A} \\ K_y &= \frac{\overline{FY}}{\overline{FX}} \\ K_z &= \frac{\overline{FZ}}{\overline{FX}} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $\overline{FX}, \overline{FY}, \overline{FZ}$ 는 각각 X, Y, Z 방향의 평균 절삭력이고, A 는 미변형 칩단면적이다.

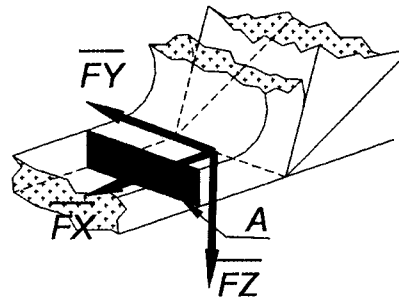


Fig. 3 Forces in cutting edge

3.2 절삭력 모델

Fig. 4와 같이 raker set의 경우 톱날은 좌굴절 톱니, 직선 톱니, 우굴절 톱니, 직선 톱니, 좌굴절 톱니의 순으로 반복을 하게 된다. 따라서 톱니에 걸리는 절삭력은 이 세가지 각각의 경우에 대하여 모델링하여야 한다. 먼저 Fig. 5에서와 같이 톱니가 왼쪽으로 굽은 경우는 기하학적 해석으로부터 식 (5)와 같이 구할 수가 있다.

$$\begin{bmatrix} FX_i(i-1) \\ FY_i(i-1) \\ FZ_i(i-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\gamma_z & -\sin\gamma_z & -\sin\gamma_x \sin\gamma_z \\ \sin\gamma_z & \cos\gamma_x \cos\gamma_z & \sin\gamma_x \cos\gamma_z \\ 0 & -\sin\gamma_x \cos\gamma_z & \cos\gamma_x \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Fx_i(i-1) \\ Fy_i(i-1) \\ Fz_i(i-1) \end{bmatrix} \quad (5)$$

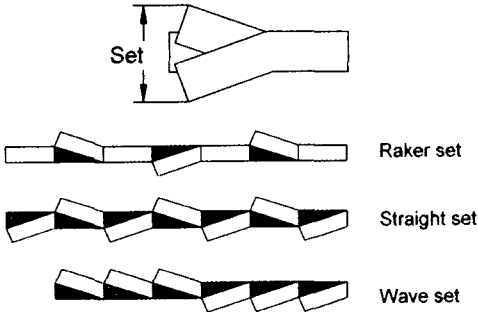


Fig. 4 Set patterns

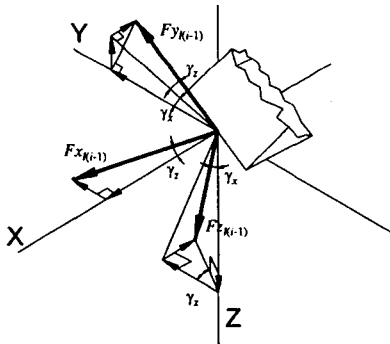


Fig. 5 Left bent saw tooth

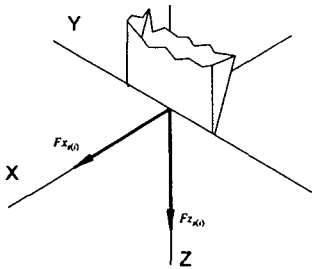


Fig. 6 Straight saw tooth

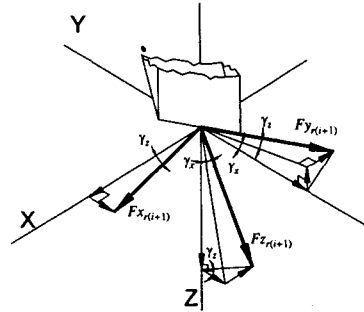


Fig. 7 Right bent saw tooth

여기서 γ_x, γ_z 는 각각 X, Z 축에 대한 톱니의 회전 각도를 나타내며, i 는 톱니의 순번이다. 식 (5)의 $F_x(i)$ 에 해당하는 비절삭저항, 미변형 칩단면적, 그리고 비절삭계수를 대입하면 X, Y, Z 방향에 대한 절삭력을 구할 수가 있다. 또한 왼쪽으로 굽은 톱니 다음에 오는 직선 톱니의 경우는 Fig. 6과 같이 미변형 칩단면적의 법선방향과 X축이 일치하기 때문에 식 (6)과 같이 절삭력을 모델링 할 수가 있다.

$$\begin{bmatrix} FX_s(i) \\ FY_s(i) \\ FZ_s(i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Fx_s(i) \\ Fy_s(i) \\ Fz_s(i) \end{bmatrix} \quad (6)$$

마찬가지로 오른쪽으로 톱니가 굽은 경우에는 Fig. 7과 같이 왼쪽의 경우와 동일하게 식 (7)로 모델링 할 수가 있다.

$$\begin{bmatrix} FX_r(i+1) \\ FY_r(i+1) \\ FZ_r(i+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\gamma_z & -\sin\gamma_z & -\sin\gamma_x \sin\gamma_z \\ -\sin\gamma_z & -\cos\gamma_x \cos\gamma_z & -\sin\gamma_x \cos\gamma_z \\ 0 & -\sin\gamma_x \cos\gamma_z & \cos\gamma_x \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Fx_r(i+1) \\ Fy_r(i+1) \\ Fz_r(i+1) \end{bmatrix} \quad (7)$$

따라서 톱니가 하나 이상 절단에 작용하는 다인절삭의 경우, 식 (5), (6), (7)을 식 (8)과 같이 합함에 의하여 절삭력을 구할 수가 있다.

$$\begin{bmatrix} FX \\ FY \\ FZ \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^{n/3} \left\{ \delta_i \begin{bmatrix} FX_i(i-1) \\ FY_i(i-1) \\ FZ_i(i-1) \end{bmatrix} + \delta_s \begin{bmatrix} FX_s(i) \\ FY_s(i) \\ FZ_s(i) \end{bmatrix} + \delta_r \begin{bmatrix} FX_r(i+1) \\ FY_r(i+1) \\ FZ_r(i+1) \end{bmatrix} \right\} \quad (8)$$

여기서 n 은 총 톱니의 수이고, δ 는 kronecker delta로서 절삭에 참여하면 1이고, 아니면 0이다.

4. 실험 장치 및 방법

본 실험에 사용된 톱기계는 수평형 띠톱기계(KDBS 450A : (주)경동기계)이고, 실험장치의 개략도는 Fig. 8과 같다. 본 연구에 사용된 톱날은 STARRETT회사의 표준톱니형상, 정상피치(regular pitch, 3 피치), raker set을 사용하였다 (Bearcat M42). 톱기계의 베이스 위에는 3축방향의 절삭력을 측정할 수 있는 공구동력계(KISTLER : 9257A)를 고정하고, 공구동력계위에 공작물을 장착할 수 있는 치구를 설치하였다. 사용된 소재는 연강(SS41)으로서 두께는 8mm 및 25mm를 사용하였다. 먼저 8mm의 소재두께를 사용한 이유는 톱니간의 거리가 8.3mm이므로 절삭할 때 마치 fly 절삭과 같은 단인 절삭이 가능하기 때문이다. 따라서 한 톱니에 해당하는 평균 절삭력을 측정하기 쉽고, 한 톱니에 대한 평균절삭력을 이용하여 비절삭저항을 구하는데 용이해진다. Sarwar는 밴드톱날에서 톱니 1개를 떼내어 선반의 공구대에 고정한 후 한 톱니에 대한 평균절삭력을 구한데 반해, 본 연구는 소재의 두께 조정에 의해 톱기계에서 바로 한 톱니의 절단에 대한 절삭력을 측정할 수가 있었다⁶⁾. 비절삭저항을 구한 후 실제 절삭력 예측 모델의 검증을 위해서는 톱니 3개가 동시에 절삭에 참여할 수 있도록 하기 위하여 별도로 소재의 두께가 25mm인 소재를 절단하는 실험이 이루어졌다. 절삭과정중에 공구동력계로부터 나오는 신호는 전하 증폭기(charge amplifier)에서 증폭된 후에 A/D 변환기를 거쳐서 퍼스널 컴퓨터에 저장되도록 하였다. 실험에 사용된 실험조건은 Table 1에 나타내었다.

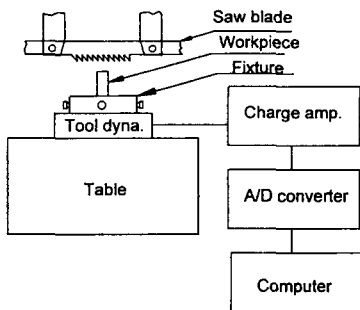


Fig. 8 Experimental setup

Table 1 Experimental conditions

Cutting speed (m/min)	30, 48
Feed rate (mm/min)	15, 40, 84, 189
Tilt angle about X axis (r_x)	5°
Tilt angle about Y axis (r_y)	6°
Saw blade dimension (mm)	4670×38×1.3
Sampling frequency (Hz)	1000
Number of sampled data	1024
Workpiece material	SS41

5. 결과 및 고찰

5.1 비절삭저항의 산출

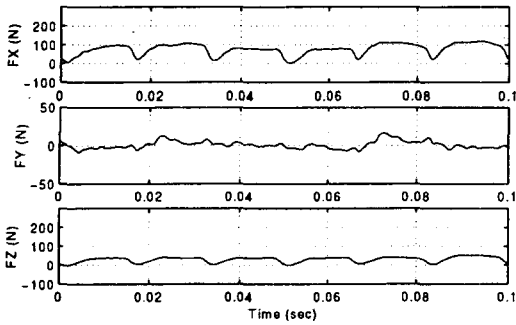
절삭력의 예측을 위하여 먼저 비절삭저항을 산출하였다. 비절삭저항을 산출하기 위해서는 단인절삭효과를 내는 fly 절삭으로서 절삭속도는 4단계 (30-77 m/min), 절입이송속도는 5단계 (15-332 mm/min)로 변화시키면서 총 20개의 절삭력을 Fig. 9와 같이 측정하였다. 비절삭저항을 구하기 위해서는 가장 널리 사용되고 있는 모델로서 비절삭저항과 미변형 칩단면적사이의 관계식인 $K_f = \alpha \cdot A^\beta$ 를 이용하였다. 여기서 α, β 는 모델링될 상수이고, A 는 미변형 칩단면적이다. 이 식을 사용하여 Fig. 9와 같이 측정된 20개의 절삭력 데이터를 이용하여 Fig. 10과 같이 비절삭저항을 최소자승법으로 모델링하면 식(9)와 같이 비절삭저항값을 모델링할 수가 있다.

$$K_f = 1427.6A^{-0.295} \quad (9)$$

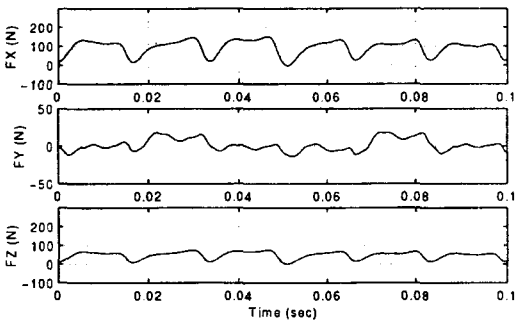
한편 나머지 비절삭계수 K_y, K_z 식 (4)를 이용하여 계산하였다.

5.2 단인절삭에서의 모델 검증

Fig. 11은 단인절삭에서 절삭속도 30 m/min, 절입이송속도 84 mm/min일 때 예측된 절삭력과 측정된 절삭력의 값을 그래프로 나타낸 것이다. 시뮬레이션의 경우는 절삭력은 정확하게 사다리꼴 형태를 띄게 되지만, 측정값의 경우는 시간지연요소, 밴드의 진동 등 외적요소에 의하여 정확한 사다리꼴을 나타내지는 못하고 있다. 그러나 절삭력의 크기 측면에서는 예측값과 측정값이 잘 일치하고 있음을 알 수가 있다. 그리고 절삭력은 절삭방향인 X방향의 절삭력이 가장 크고, 다음으로 절입과 관련된 Z방향의 힘



(a) cutting speed : 30 m/min, feed rate : 84 mm/min



(b) cutting speed : 30 m/min, feed rate : 189 mm/min

Fig. 9 Measured cutting forces with fly cutting

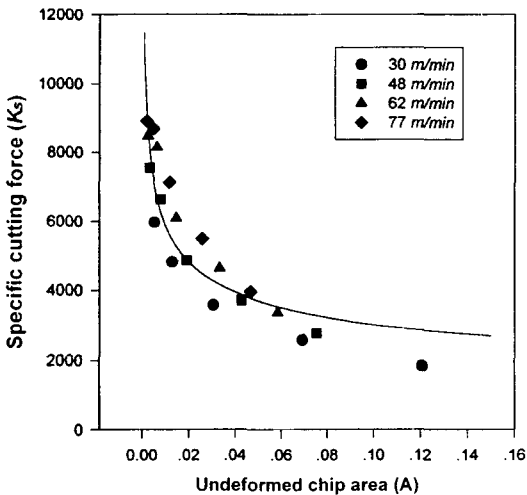


Fig. 10 Estimation of specific cutting force

이 크게 작용하고 있다. 이 경우 Z방향과 X방향 절삭력의 비는 0.5정도로서, 절삭에서 일반적으로 알려진 절삭력과 배분력의 비인 0.4보다 다소 큰 값으로 나타났다. 이는 절입이송방향이 배분력의 방향과 같기 때문인 것으로

사료된다. 이상에서 보는 바와 같이 단인절삭의 경우 산출한 비절삭저항값을 이용하여 절삭력을 잘 모델링할 수가 있음을 알 수가 있다. 또한 시뮬레이션 및 절삭실험에서 나타난 바와 같이 톱날에서 톱니가 좌, 우, 직선으로 성형된 것은 전체 절삭력의 변동에 있어서 거의 영향을 미치지 않고, 오히려 외란성분의 영향이 더 지배적으로 작용하고 있음을 알 수가 있다.

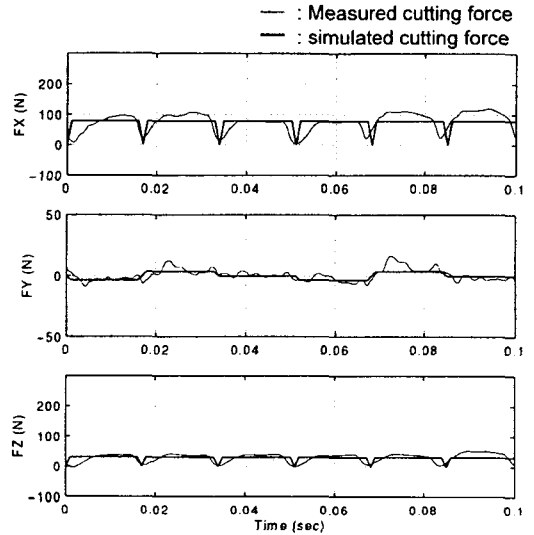


Fig. 11 Measured and simulated cutting forces with fly cutting (cutting speed : 30m/min, feed rate : 84mm/min)

5.3 다인절삭에서의 모델적용

다인절삭실험은 시편의 두께가 25 mm에 대하여 적용이 되었는데 이 경우 항상 톱니는 3개가 소재의 절단에 참여하게 된다. Fig. 12는 절삭속도 48 m/min, 절입이송속도 189 mm/min인 경우에 대한 절삭력 예측과 측정된 절삭력을 나타내고 있다. 이 경우에도 단인절삭의 경우와 마찬가지로 사다리꼴 형태의 절삭력으로 예측이 되어서, 측정값도 그러한 형태를 유지하였다. 그리고 Y방향은 거의 절삭력이 작용하지 않으며, X 및 Z방향 절삭력의 비도 단인절삭과 비슷한 값을 잘 나타내고 있다. 다인절삭의 경우에도 본 연구에서 개발한 모델은 비교적 잘 일치하고 있으나, 절삭날의 생성과정에서 런아웃의 문제, 밴드의 진동문제 등을 종합적으로 고려함에 의하여 더욱 정확한 절삭력의 예측이 가능할 것으로 사료된다. 이 경우 각각의 방향에 대한 절삭력은 단인절삭에서의 절삭력의 약 3배에 달하는 힘이 나왔으며, 따라서 다인절삭의

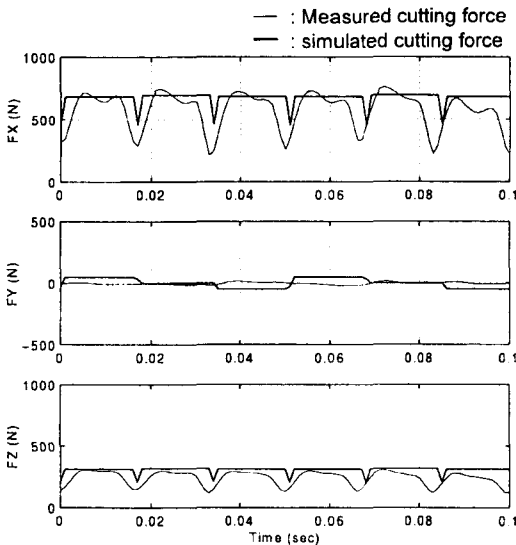


Fig. 12 Measured and simulated cutting forces with multi-point cutting (cutting speed : 48m/min, feed rate : 189mm/min)

경우 단순히 단인절삭의 절삭력에다가 절단에 참여하는 날의 수 만큼 곱함에 의하여 절삭력을 예측할 수 있음을 알 수가 있다.

6. 결 론

밴드소잉을 하는 톱절단에서 절삭력을 예측하는 모델을 설정하기 위하여 본 연구에서는 톱니의 기하학적 형태를 고려한 역학모델을 사용하였다. 역학모델을 사용하기 위해서는 비절삭저항값의 산정이 필수적인데, 톱날과 같은 다인절삭과정에 대하여 본 연구에서는 단인절삭기법을 도입하여 fly 절삭개념의 절삭을 이룰 수가 있었다. 이를 통하여 비절삭저항값을 모델링해낼 수가 있었다. 모델의 검증과정인 단인 및 다인절삭 실험을 통하여 본 연구에서 구축한 역학모델은 실제 절삭력을 잘 모델링할 수가 있음을 보였다. 그러나 톱날의 경우 톱니성형과정이 정밀하지 않기 때문에 톱니의 런아웃문제, 톱날밴드의 횡진동문제, 구동부인 회전폴리의 불균형문제 등을 고려하여야 정확한 절삭력을 모델링할 수가 있다.

후 기

이 연구는 1996년도 한국과학재단 산학협력연구 연구

비지원에 의한 결과(과제번호 : 95-2-09-04-01-1)이며 본 연구를 위해 장비를 기증한 (주)경동기계 이 현우 사장님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. P. F. Ostwald, J. Munoz, Manufacturing Processes and Systems, John Wiley & Sons, Inc., 1997.
2. A. G. Ulsoy, C. D. Mote, Jr, "Vibration of wide band saw blades," ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 104, pp. 71-78, 1982.
3. J. F. Carlin, F. C. Appl, H. C. Bridwell, R. P. Dubois, "Effects of tensioning on buckling and vibration of circular saw blades," ASME Journal of Engineering for Industry, pp. 37-48, 1975.
4. H. Chandrasekaran, S. Svensson, M. Nissle, "Tooth chipping during power hack sawing and the role of saw material characteristics," Annals of the CIRP, Vol. 36, No. 1, pp. 27-31, 1987.
5. H. Chandrasekaran, H. Thoors, H. Hellbergh, L. Johansson, "Tooth chipping during band sawing of steel," Annals of the CIRP, Vol. 41, No. 1, pp. 107-111, 1992.
6. M. Sarwar, D. Gillibrand, S. R. Bradbury, "Forces, surface finish and friction characteristics in surface engineered single- and multiple-point cutting edges," Surface and Coating Technology, Vol. 49, pp. 443-450, 1991.
7. W. M. M. Hales, M. Sarwar, "Geometrical parameters affecting hack saw blade performance," Proceedings of the 10th ICPR, Cincinnati, USA, pp. 1802-1810, 1987.
8. M. Sarwar, S. R. Bradbury, M. Dinsdale, "An approach to computer aided bandsaw teeth testing and design," Proceedings of the 4th National Conference on Production Research, Sheffield, UK, pp. 494-501, 1989.

9. W. E. Henderer, J. D. Boor, J. R. Holston, "Estimation of cutting forces in band sawing metals," Transactions of the NAMRI of SME, Vol. 24, pp. 33-38, 1996.
10. M. E. Martellotti, "An analysis of the milling process," Trans. ASME, Vol. 63, pp. 667-700, 1941.
11. M. E. Martellotti, "An analysis of the milling process. Part II: Down Milling," Trans. ASME, Vol. 67, pp. 233, 1945.
12. F. Koenigsberger, A. J. P. Sabberwal, "An investigation into the cutting force pulsation during milling operation," Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 1, p. 15, 1961.
13. W. A. Kline, R. E. DeVor, J. R. Lindberger, "The prediction of cutting forces in end milling with application to cornering cut," Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 22, No. 1, p. 7-22, 1982.
14. H. J. Fu, R. E. DeVor, S. G. Kapoor, "A mechanistic model for the prediction of the force system in face milling operation," ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 106, pp. 81-88, 1984.