

연삭공정시 동적 모델링 (Dynamic Modelling of Grinding Process)

이상철, 광재섭, 홍순익(부산대 대학원), 송지복 (부산대)

S.C.Lee, J.S.Kwak, S.Y.Hong (Pusan Nat. Univ. Grad.), J.B.Song (Pusan Nat.Univ.)

ABSTRACT

This paper presents, step-by-step, the capabilities that a general-purpose simulation environment, such as Simulab/Matlab, provides for an intuitive and efficient modelling of grinding processes. Starting from a revision of the different approaches which can be found in the technical literature the paper begins with the well-known block-diagram first presented by Snoyes. Next, the paper shows how this block-diagram is incorporated into the Simulink environment and how the different parameters for the simulation are introduced in the model(machine, grinding wheel and process parameters). Special attention is paid to the fact that nonlinear phenomena can easily be included

Keywords : Dynamic Modelling(동적 모델링),Chatter(진동), Simulink/Matlab(시뮬링크/매토랩)

1 서론

연삭가공 공정의 모델링과 시뮬레이션 작업은 복잡한 인자들을 고려한 최적화 작업을 이루려는 노력이 많이 진행이 되어지고 있으며, Inasaki 등은 원통 연삭가공시 일어나는 여러 거동(연삭 사이클, 연삭력, 실가공량, 온도, 열 손상, 열팽창, 휠 마모, 표면 거칠기 등)을 간단하면서도 안정적인 해석을 할 수 있도록 전통적인 제어방법을 이용한 자려진동과 공작물의 결합을 관련시켜 해석을 하였고, 또 폐루프(closed-loop)의 특성방정식의 근을 이용하여 안정화에 필요한 불안정 성장계수를 구하였다. Snoeys 등은 연삭공정을 폐루프 블락선도를 이용하여 모델링을 하였으며, 이것은 여러 논문들의 원인으로 많이 활용이 되어지고 있다.^[1,2,3]

Vinolas 등은 Snoeys의 연구를 더 발전시켜 연삭공정의 블락선도를 이용하여 원통연삭시의 동적모델링을 세우고 이것을 이용하여 공작물의 가공시 발생하는 진원오차를 예측하였다.^[4] 따라서 본 논문에서는 이 원통회경연삭의 동적 모델링에서 발생하는 연삭력, 휠의 마모, 공작물의 마모량과 인피드레이트 등을 Simulink/Matlab을 이용하여 시각적으로 표현해 보고자 하였으며, 원통연삭 모델과 Nishihara의 열변형 근사해를 사용하여 평면연삭에 적용시켜 발생하는 여러 거동들을 시뮬레이션 하여 일반적인 연삭공정의 변수

를 찾아내고 실제 연삭가공시의 결과들과 비교하여, 타당성을 입증해 보고자 하였다.

2 이론적 배경

2.1 원통공정의 동적 모델링

이 모델을 Snoeys와 Vinolas의 원통연삭시의 블락선도 모델을 기초로 하여 평면연삭에 적용을 시켰으며, 연삭공정의 지배 방정식은 다음과 같다.

$$u(t) = \delta_w(t) + \delta_s(t) + y_k(t) + y_m(t) \dots(1)$$

$\delta_w(t)$:공작물의 마모 $\delta_s(t)$:휠의 마모

$y_k(t)$:접촉영역의 변형 $y_m(t)$:기계적 변형

$u(t)$:절입깊이

여기서 재생효과를 고려해 주어야 하는데, 재생효과라는 것은 휠이 매 회전마다 접촉하는 입자나 앞회전시와 다음회전시 휠의 마모를 고려해 주는 인자를 의미하며, 따라서 다음과 같은 식으로 표현이 가능하다.

$$\Delta \delta_s(t) = \delta_s(t) - \delta_s(t - \tau_s) \dots(2)$$

$$\Delta \delta_w(t) = \delta_w(t) - \delta_w(t - \tau_w)$$

여기서 τ_s 와 τ_w 는 휠이나 공작물의 초당 회전수를 의미한다.

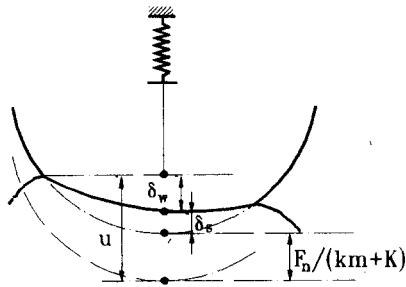


Fig. 1 Plunge cylindrical grinding

일반적으로 연삭가공시에 연삭력과 휠의 마모나 공작물 마모의 순간변화량과 선형적인 관계가 있다는 가정하에서 다음과 같은 방정식을 얻을 수가 있다.

$$F_c = K_s \times \Delta\delta_s \quad \dots(3)$$

$$F_c = K_w \times \Delta\delta_w$$

다음으로 문제가 되는것이 연삭가공시 연삭기와 휠 그리고 공작물이 매 회전마다 다른 강성을 가지게 되므로 전달함수로 연삭력에 기인한 공작물과 휠 그리고 기계의 동적인 변형에 관련된 전달함수 $H(s)$ 는 실험에 의해서 얻을 수가 있다.

각 인자는 Experimental Modal Analysis(EMA)로 휠과 공작물에 대한 컴플라이언스(compliance)를 측정할 수가 있다. 여기서 여러개의 모드나 모달 주파수가 기계의 동적인 요인으로 작용을 하지만 간단하면서도 효과적인 결과를 얻기 위해서 1차 모드와 저주파 영역에서의 고차모드를 잔류유연성인자(residual flexibility $1/k_R$)로 고려하여 다음과 같은 식을 얻었다.

$$F_c = \frac{1}{H(s)} \times y_m$$

$$= \frac{1}{\sum_{r=1}^N \frac{\omega_r^2}{k_r \times (s^2 + 2s\xi_r\omega_r + \omega_r^2)}} \times y_m$$

$$H(s) \cong \frac{\omega_1^2}{k_1 \times (s^2 + 2s\xi_1\omega_1 + \omega_1^2)} + \frac{1}{k_R} \quad \dots(4)$$

여기서 잔류 유연성인자의 평가는 기계적 강성 k_m 으로부터 EMA를 통해서 측정을 할 수가 있으며 다음과 같은 관계식을 만족한다.

$$\frac{1}{k_m} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_R} \quad \dots(5)$$

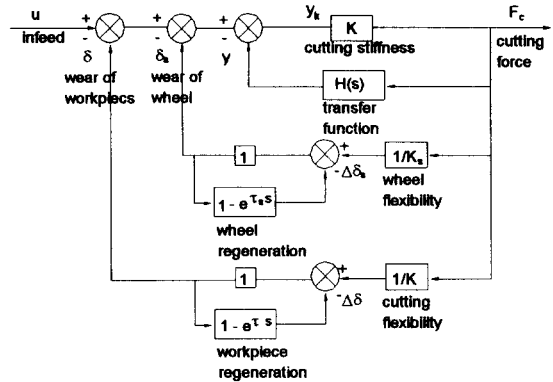


Fig. 2 Closed-loop block diagram

모델링 시에 또 다른 하나의 어려운 문제점은 휠과 공작물의 접촉영역에서의 접촉강성(K)로써, 여러 가지 인자(예를 들면 접촉강성이 연삭력의 함수)에 의해서 변하는 비선형 방정식으로 이루어지며 접촉영역에서 다음과 같은 가정하에서 구할 수가 있다.

- ① 연삭숫돌면을 모든 연삭입자에 의한 개별적인 스프링으로 구성된 하나의 시스템이다.
 - ② 연삭숫돌 외주면에서 연삭입자의 분포는 반경방향에 대하여 선형적이다.
 - ③ 모든 입자는 동일한 스프링 상수 k 을 가진다.
- 접촉강성은 다음과 같은 식으로 표현이 가능하며,

$$F_c = K \times y_k \quad \dots(6)$$

Fig. 2는 위의 식들을 병렬로 연결한 블락선도이고 이것을 다음과 같이 시뮬링크를 사용하여 모델링을

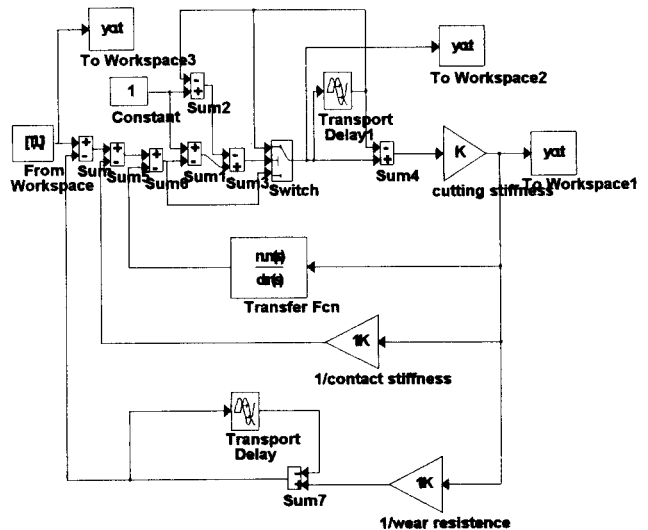


Fig. 3 Simulink model of the plunge grinding process

세울수가 있는데, 시뮬링크 모델을 다음과 같이 설정을 하였다.

- ①시뮬레이션되기 이전에 각각의 블락들은 M파일이나 각각의 상수값들을 측정하여 지정하였다.
- ②식(2)에서의 휠과공작물의 재생효과는 time delay block을 사용하여 표현을 하였다.
- ③시뮬레이션에서 미분방정식은 Runge-Kutta 5차를 사용하였으며, 다른 인자들은 여러번의 시뮬레이션으로 최적의 인자를 선택하였다.
- ④원통연삭가공시는 입력함수인 인피드를 램프함수를 사용하였고, 평면연삭시에는 스텝함수를 사용하였으며, 형상오차의 시뮬레이션에서 얻은 방정식을 보상인자로 입력함수에 추가를 하였다.

2.2 열변형의 근사해석

연삭가공시 형상오차를 일으키는 요인에는 열팽창에 의한 굽힘변형과 자력의 의한 변형과 같이 공작물을 직접변형시키는 요인과 슷돌과 슷돌축의 탄성휨과 같은 공작물과 상대변형을 일으키는 요인으로 분류를 할 수가 있는데, 이때 형상오차에 가장 크게 영향을 미치는 인자를 가공시 발생하는 열로 가정을 하면, 가공이 진행됨에 따라서 가공물의 상면과 하면의 온도차에 의한 열응력이 발생하여 공작물에 굽힘 모멘트(M)가 작용하게 된다.

다음의 가정하에서 형상오차의 V(x)는 아래와 같이 쓸 수가 있다.

- ①연삭초기의 굽힘모멘트 M이 종료시까지 일정
- ②연삭개시점부터 연삭스틀이 통과 할때까지 공작물에 굽힘 모멘트가 작용

$$\frac{d^2 V(x)}{dx^2} = -\frac{M}{EI} \quad (0 \leq x \leq a)$$

$$\frac{d^2 V(x)}{dx^2} = 0 \quad (a \leq x \leq L) \dots(7)$$

여기서, E : 종탄성계수 I : 단면 2차 모멘트
M : 굽힘 모멘트 L : 공작물의 길이
위에 미분 방정식에서 x에 관해서 2중 적분을 하면

$$V(x) = \frac{M}{2EI} \left\{ ax(2 - \frac{a}{L}) - x^2 \right\} \quad (0 \leq x \leq a)$$

$$V(x) = \frac{Ma^2}{2EI} \left(1 - \frac{x}{L} \right) \quad (a \leq x \leq L) \dots(8)$$

두 식에서 경계조건 x=a에서 V(x)가 같고, x=0와 x=L에서의 V(x)=0을 만족하므로 형상오차는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$V(x) = \frac{Ma^2}{2EI} \left(1 - \frac{a}{L} \right) \dots(9)$$

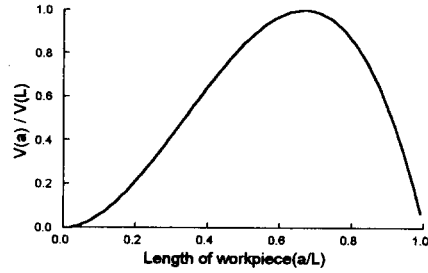


Fig. 4 Estimated geometric error

여기서 최대형상오차는 a/L이 2/3인 지점에서 $2ML^2/27EI$ 의 값을 가짐을 알 수가 있다.

Fig. 3는 시뮬레이션의 결과를 나타낸 그래프이다.

2.3 평면연삭의 동적 모델링

평면연삭에서 가장 고려해야 될 사항이 열변형에 의한 형상오차의 보정인데, 위의 근사해석에서 보듯이 최대형상 오차를 외란으로 보정을 해 주어야 한다. 그리고 휠의 재생효과는 평면연삭에서는 의미가 없기 때문에 위의 식 (1)과 식 (2)는 다음과 표현이 가능하며,

$$u(t) = d + K \cdot t^2 \times (1 - t/T_s)$$

$$= \delta_w(t) + \delta_s(t) + y_k(t) + y_m(t)$$

$$\Delta \delta_s(t) = \delta_s(t) - \delta_s(t - \tau_s) \quad \dots(10)$$

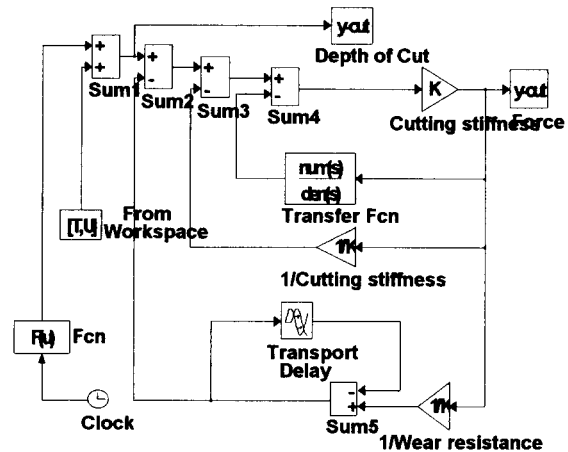


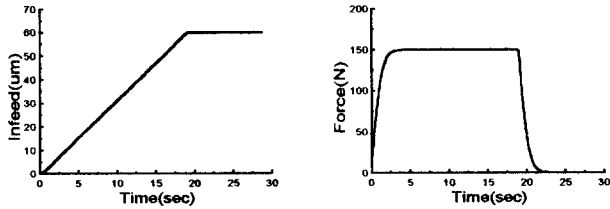
Fig. 5 Simulink model of the surface grinding process

위의 Fig. 5는 평면연삭공정의 동일한 가정하에서의 블락선도를 이용하여 시뮬링크로 모델링 한 것인데, 여기서 입력은 스텝함수를 사용하였으며, 열변형에 의한 외란의 요인을 입력함수로 가정을 하여 같은 방법으로 시뮬레이션을 하였다.

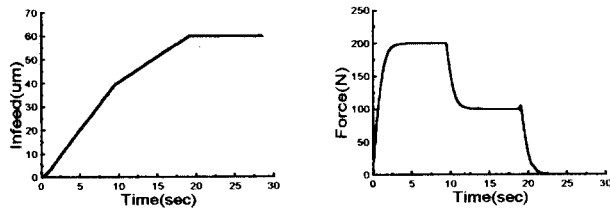
3 시뮬레이션 결과

3.1 원통외경연삭

아래 Fig. 5는 2 stage infeed와 3 stage infeed의 시뮬레이션 결과를 보여주고 있는데, 연삭력과 total infeed를 보여주고 있다.



(a) 2 stage infeed



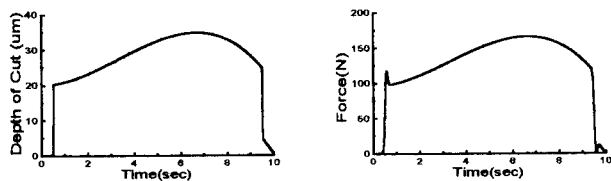
(b) 3 stage infeed

Fig. 6 Simulation of the plunge grinding

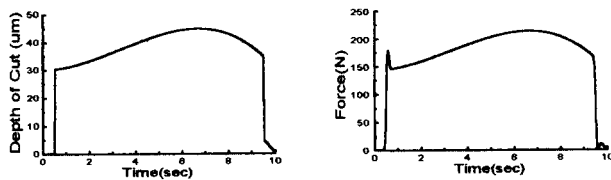
위의 결과에서 알 수 있듯이 일반적으로 같은 양의 인피드에서도 인피드레이트(infeed rate)에 따라서 연삭력이 비례한다는 것을 보여주고 있다.

3.2 평면연삭

Fig. 7은 평면연삭의 시뮬레이션 결과로서 절입깊이를 20과 30um로 했을때의 절입깊이와 연삭력의 시간 거동을 보여주고 있다.



(a) Depth of cut : 20



(c) Depth of cut : 30

Fig. 7 Simulation of the surface grinding

위의 결과에서 알 수 있듯이 절입깊이와 연삭력은 비례한다는 것을 알 수가 있으며, 초기의 피크치는 시뮬레이션시의 오차인데, 이것은 연삭의 개시점에서 슛돌축이 무부하상태에서 일시적으로 큰 연삭력을 받음으로 인해서 생긴 것으로 전체 시스템의 강성과 관련된 인자로 볼 수가 있다.

4. 결론

이번 논문은 일반적으로 연삭가공시 중요시 되고 있는 안정성 평가를 위하여 가공중이나 정적 특성을 분석하는 방법으로 주파수 분석이나 공정을 블록선도를 이용하여 특성방정식의 근을 이용하는 방법등이 사용되었다. 따라서 이 파라메타들을 이용하여 시간 영역에서 연삭공정시의 동적인 모델링을 시각적이고 효율적인 모델링을 위하여 매트랩의 도구인 시뮬링크를 사용하여 가시화 시켰으며, 더 나아가 평면연삭시의 열변형을 고려한 외란요소를 추가함으로써 평면연삭에서 동적인 모델링을 하였으며, 시뮬레이션의 결과가 타당함을 보였다. 이 방법을 이용하여 여러 가지 모형의 모델을 사용하여 시뮬레이션을 할 수 있다는 근거를 제시하였으며, 앞으로 타당한 공정시의 변수를 추가함으로써 우리가 원하는 동적인 거동들을 추정할 수가 있다는 결론을 얻었다.

참고문헌

- [1] N. Chiu, S. Malkin "Computer Simulation for Cylindrical Plunge Grinding", Annals of the CIRP, p.383-387, (1993)
- [2] R. Snoyes, I-C. Wang, "Analysis of the Static and Dynamic Stiffnesses of the Grinding Wheel Surface", Proc. 9th. MTDR Conf., Birmingham, p.1133-1148, (1968)
- [3] R. Snoyes, D. Brown, "dominating Parameters in Grinding Wheel and Workpiecd Regenerative Chatter", Proc. of the 10th. Int. Mach. Tool Des. and Res. Conf., p.325-348(1969)
- [4] J. Vinolas, J. Biera, J. Nieto, etc. "The Use of an efficient and Intutive Tool for the Dynamic Modelling of Grinding Process", Anals of the CIRP,(1997)
- [5] T. Nishihara, S. Okuyama, S. Kawamura, "Study on the Flatness of Work Prodedd by Surface Grinding - Effects of Bending Caused Grindin-g Heat", JSPE Vol. 54, No. 8, p.1496-1501(1988)