

◆ 특집 ◆ 공작기계의 소비 에너지 저감기술

이중 시간지연을 가지는 비선형 연삭기의 가공 에너지 밀도 최적화 연구

A Study on the Optimization of Grinding Energy Density for a Non-linear Grinding System with Dual Time Delay

정지현¹, 김필기¹, 이정인¹, 이수영¹, 이종항², 김경동³, 석종원^{4,✉}
Jeehyun Jung¹, Pilkee Kim¹, Jung-In Lee¹, Sooyoung Lee¹, Jong-Hang Lee²,
Kyung-Dong Kim³, and Jongwon Seok^{4,✉}

1 중앙대학교 기계공학부 대학원 (Graduate School of Mechanical Engineering, College of Engineering, Chung-Ang Univ.)

2 한국산업기술대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Korea Polytechnic Univ.)

3 한국공작기계산업협회 (Korea Machine Tool Manufacturers' Association)

4 중앙대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, College of Engineering, Chung-Ang Univ.)

✉ Corresponding author: seokj@cau.ac.kr, Tel: +82-2-820-5729

Manuscript received: 2013.3.8 / Accepted: 2013.3.27

The present study treats the optimization process for a non-linear grinding system with dual time delay, mainly from the energetic viewpoint. To this end, the stability of the grinding system is investigated first with regard to the grinding wheel rotation speed. The concept of grinding energy density is newly proposed as the primary figure of merit and this quantity is evaluated at various stable and limit cycle conditions. The computational results show that simple monotonic trend in energy density is observed under stable conditions, whilst rather complicated behaviors can appear when the conditions are associated with limit cycle oscillations. Finally, the relations between the vibration amplitude and the energy density and their implications on the engineering decision/compromise are discussed.

Key Words: Cylindrical Grinding (원통 연삭), Dual Time Delay (이중 시간지연), Grinding Energy Density (연삭 가공 에너지 밀도), Energy Optimization (에너지 최적화)

1. 서론

현대 산업사회에서 에너지의 중요성은 날이 갈수록 커지고 있다. 초기 산업사회는 거의 무한정의 에너지를 토대로 급속한 발전을 이뤘지만, 1970년대 이후로 한정된 에너지 자원에 대한 경고가 꾸준히 제기되어 왔고,¹ 이제는 에너지 효율적 관점을 배제한 기술 개발은 의미가 없다고 해도 과언이 아닐 정도로 산업사회에서의 에너지 의존도

는 갈수록 높아지고 있다. 뿐만 아니라 근래에는 전 세계적으로 녹색성장에 대한 인식이 확대됨에 따라 에너지의 효율적 사용에 대한 공감대가 폭넓게 형성되고 있다. 이에 따라 기존의 미국, 유럽, 일본 등 몇몇 선진국 중심의 에너지 규제정책이 점차 전 세계적으로 확대되고 있고, 그에 대응할 수 있는 기술적 성장 또한 크게 요구되고 있다. 특히 우리나라의 산업분야 에너지 사용량은 제조업 분야가 90% 이상을 차지하고 있고 (Table 1 참

Table 1 Energy consumption in Korea industry field⁴

Year	Manufacturing (1000 toe)	Nonmanufacturing (1000 toe)	Total (1000 toe)	Manuf. /Tot. (%)
1995	57,625	5,321	62,945	91.5
2000	77,583	6,329	83,912	92.5
2005	88,485	5,881	94,366	93.8
2010	109,091	6,065	115,156	94.7

조), 그 비율도 꾸준히 상승하고 있음을 감안할 때, 앞으로 제조산업 분야의 에너지 저감에 대한 각종 정책 및 규제는 더 엄격해질 것으로 예상된다.

이와 같이 제조산업의 에너지 저감 필요성이 증대되고 있는 상황에서, 필연적으로 제조·생산 시스템의 근간을 이루는 공작기계의 에너지 저감 및 에너지 효율 증대와 관련된 이슈 또한 크게 부각되고 있다. 이는 유럽의 사례를 통해서도 확인할 수 있는데, EC (European Commission)에서는 환경 친화 설계 (eco-design)에 대한 working plan (2009-2011)에 공작기계를 우선적으로 다루어야 할 10대 제품군 중 하나로 포함시켜, 이에 대한 연구를 적극적으로 지원하고 있다.² 한편, Park 등³은 제조산업 분야에서의 에너지 저감 기술에 대해 폭넓게 조사 하면서, 공작기계의 에너지 저감 기술의 연구 범주를 다음의 다섯 가지로 분류하였다: 1) 가공 재료의 최소화 (near-net-shape), 2) 절삭유의 최소화 (MQL), 3) 다목적 공작기계의 개발, 4) 불필요한 작동 시간의 최소화, 5) 설비 설계의 최적화. 이처럼 공작기계의 에너지 저감 기술은 다양한 방향에서 통합적으로 연구되고 있다.

이러한 공작기계 중 하나인 연삭기는 금속 제조 산업분야의 가장 기초적인 역할인 재료의 표면 연삭을 담당하는 가공장비로서, 높은 형상 정밀도와 빠른 연삭 속도의 이점을 두루 갖추어 최신의 제조 공정에서도 전략적으로 사용되고 있다. 이러한 연삭기는 가공물뿐만 아니라 비교적 크기가 크고 무거운 연삭 스톨을 고속으로 회전시켜야 하기 때문에 많은 에너지를 소모하게 되고, 따라서 제조 공정의 에너지 저감을 목적으로 연구하기에 적합한 대상이라 할 수 있다. 지금까지의 연삭 시스템에 대한 연구는 주로 실험적인 방법을 통한 연삭력 모델링,⁵ chatter 진동 제어,⁶ 그리고 드물게 에너지 소비와 관련된 분야에서 진행되어 왔고,⁷ 이론적·해석적 연구는 선반이나 밀링과 같은 여타 공작기계에 비해서 많이 진행되진 못하였다. 이는 연삭 시스템은 선반이나 밀링과 다르게 연삭 스톨의 동역학적 효과를 모델에 반영해야 하고, 이로

인해 시스템에 가공물에 의한 시간지연항 뿐만 아니라 연삭 스톨에 의한 시간지연항이 추가되어 시스템의 거동을 예측하거나 분석하기가 비교적 복잡하기 때문이다.^{8,9} 하지만 고 중량의 회전체가 고속으로 회전하는 연삭 시스템을 실험적인 방법으로만 분석하기에는 비용 및 안전 측면에서 한계가 있기 때문에 이론적인 연구가 선행될 필요성이 있다. 그러나 상기 설명한 이유로 이론적인 측면에서의 연구도 현재까지는 매우 제한적으로 이루어져 왔다. Kim 등⁸은 자신의 논문에서 비선형 원통 외경 연삭 시스템에 대한 안정성 해석 및 분기해석을 수행하였다. 이 논문에서는 특별히 chatter 진동에 대해 Boundness condition을 도입함으로써 성공적으로 선형 시스템을 분석하였고, 이를 바탕으로 교란법 (perturbation method)을 이용한 비선형 해석까지 수행함으로써, 연삭 시스템에 대한 이론적 해석의 틀을 마련하였다.

본 논문에서는 원통 외경 연삭 모델^{8,9}과 가공 에너지 밀도의 개념을 이용하여 연삭 스톨의 관점에서 연삭기의 에너지 효율에 대한 연구를 해석적인 방법으로 분석하였다. 즉, 연삭 스톨의 회전 속도 변화에 따른 시스템의 안정성을 고찰하고, 안정한 영역에서 연삭기의 가공 에너지 밀도 (피 가공물의 단위 제거 체적에 대한 소요 가공 에너지)를 최소화 시키기 위한 운전 조건 (Operation condition)을 주요 인자로 하여 연구를 수행하였다. 이와 더불어 시스템의 비선형성에 의해 야기되는 Limit cycle 형태의 chatter 진동이 일어나는 조건에서 시스템이 운전될 경우 진폭과 가공 에너지 밀도 사이의 관계를 도출하고 이를 최적화 관점에서 토론하고자 하였다.

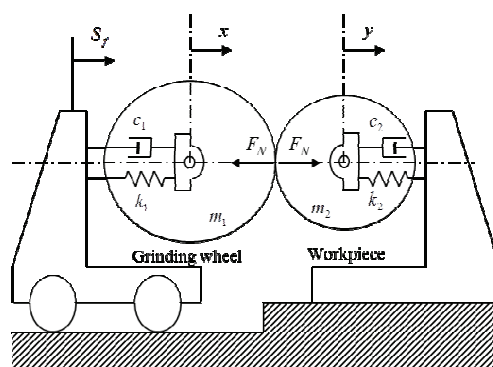


Fig. 1 A schematic of the present cylindrical grinding system

2. 운동방정식

Fig. 1에 도시한 연삭 시스템 모델을 운동방정식으로 표현하면 식 (1a)와 (1b) 같이 2자유도계 진동 시스템으로 나타낼 수 있다^{5,9}.

$$m_1\ddot{x} + c_1\dot{x} + k_1x = -K_v(\delta_s + \delta_d)^{\epsilon_0}, \quad (1a)$$

$$m_2\ddot{y} + c_2\dot{y} + k_2y = K_v(\delta_s + \delta_d)^{\epsilon_0}, \quad (1b)$$

$$K_v = Ks_1^\gamma(v_2/v_1)^{2\epsilon_0-1}D^{1-\epsilon_0}, \quad (1c)$$

$$\begin{aligned} \delta_s &= \beta_s S_f^{1/\epsilon_0} \\ &= \beta \left(\frac{k_1 k_2 D^{\epsilon_0-1} (v_2/v_1)^{1-2\epsilon_0}}{Ks_1^\gamma (k_1 + k_2)} \right)^{1/\epsilon_0} S_f^{1/\epsilon_0}, \end{aligned} \quad (1d)$$

$$\delta_d = x(t) - x(t - \tau_1) - y(t) + \alpha y(t - \tau_2), \quad (1e)$$

$$\alpha = \begin{cases} \left(1 - \frac{v_f \tau_2}{W}\right) & \text{if } 0 \leq v_f \leq \frac{W}{\tau_2} \\ 0 & \text{if } v_f > \frac{W}{\tau_2} \end{cases}. \quad (1f)$$

식 (1a)-(1f)에서 K 는 Proportionality factor, s_1 은 연삭 슷들의 Cutting edge density, γ 와 ϵ_0 는 Exponential parameter, v_1 과 v_2 는 각각 연삭 슷들과 가공물의 선속도, S_f 는 Initial feed, δ_s 와 δ_d 는 각각 Static 및 Dynamic depth of cut, D 는 Equivalent grinding wheel diameter, α 는 Overlapping factor, v_f 는 Traverse speed W 는 Width of grinding wheel, τ_1 과 τ_2 는 연삭 슷들과 가공물 각각의 변위의 시간 지연을 나타낸다. 한편, β 는 Empirical factor로, 0과 1 사이의 값을 갖는다.

Depth of cut의 지수 ϵ_0 는 일반적으로 정수가 아니기 때문에, 연삭 시스템을 해석하기 위한 이론적 해석 기법을 적용하기에 적절한 형태로 전개하면, 식 (1a)와 (1b)의 우변항은 다음과 같이 정적 평형 위치 (x_s, y_s) 에 대하여 δ_d 의 Polynomial series로 전개한 형태가 된다.

$$m_1\ddot{x}_p + c_1\dot{x}_p + k_1x_p + F'\delta_p = -\epsilon_2\delta_p^2 - \epsilon_3\delta_p^3, \quad (2a)$$

$$m_2\ddot{y}_p + c_2\dot{y}_p + k_2y_p - F'\delta_p = \epsilon_2\delta_p^2 + \epsilon_3\delta_p^3, \quad (2b)$$

$$F' = K_v \epsilon_0 (\delta_s r)^{\epsilon_0} / r, \quad (2c)$$

$$r = 1 - (1 - \alpha) \frac{y_s}{\delta_s}, \quad (2d)$$

$$\epsilon_2 = F' \frac{\epsilon_0 - 1}{2r}, \quad (2e)$$

$$\epsilon_3 = F' \frac{(\epsilon_0 - 1)(\epsilon_0 - 2)}{6r^2}, \quad (2f)$$

$$\delta_p = x_p(t) - x_p(t - \tau_1) - y_p(t) - \alpha y_p(t - \tau_2). \quad (2g)$$

식 (2a)-(2g)에서 $x_p(t)$ 와 $y_p(t)$ 는 각각 연삭 슷들과 가공물이 정적 평형 위치에 대해 시간에 따라 변하는 변위량을 나타낸다.

식 (2a)와 (2b)의 우변항을 제거하면 다음과 같은 연삭 시스템의 선형화된 방정식을 얻을 수 있다.

$$m_1\ddot{x}_p + c_1\dot{x}_p + k_1x_p + F'\delta_p = 0, \quad (3a)$$

$$m_2\ddot{y}_p + c_2\dot{y}_p + k_2y_p - F'\delta_p = 0. \quad (3b)$$

이 식에 채터 진동수의 Boundness condition⁸을 적용하고 가공물의 회전속도가 약 100RPM일때 연삭 슷들의 회전속도를 약 3500~10000 RPM의 구간에서 변화시켜 가며 Fig. 2와 같은 선형 안정 영역을 구하였다. 본 계산에 사용된 파라미터 값들은 Table 2와 같다.

Table 2 Parameter values used for calculating⁹

m_1, m_2	(Mg)	0.15, 0.1
k_1, k_2	(N/mm)	$2 \times 10^4, 3 \times 10^4$
c_1, c_2	(Ns/mm)	110, 110
D, W	(mm)	300, 50
v_f	(mm/s)	150
K	(N/mm)	500
s_1	(mm ⁻²)	200
$\gamma, \beta, \epsilon_0$		0.75, 0.5, 0.7671

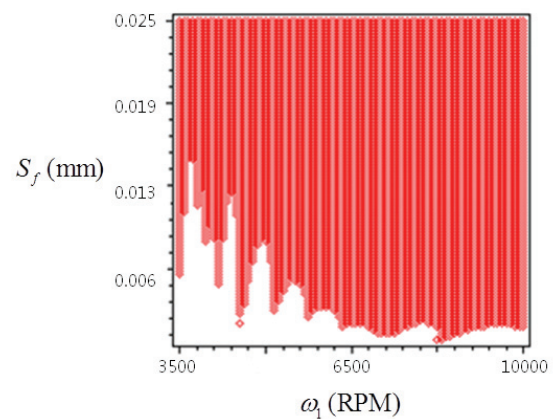


Fig. 2 Linear stability region map

한편, 본 연구에서는 안정성 해석이 연삭 슷돌의 관점에서 수행되었다. Fig. 2의 어두운 부분은 안정한 영역을 나타내고, 밝은 부분은 불안정한 영역을 나타내고 있다. 여기서 알 수 있는 사실은 연삭 슷돌의 회전속도가 증가할수록 안정한 영역이 증가한다는 것이다.

3. 가공 에너지 밀도

지난 2장에서 설명한 해석적 방법으로, 각 운전 조건하에서의 가공 에너지 밀도를 계산함으로써 에너지 측면에서 높은 효율을 내는 운전 조건을 찾을 수 있다. 가공 에너지 밀도는 연삭 슷돌과 가공물이 접촉하는 지점에서 마찰력의 파워를 재료제거율(Material removal rate; MRR)로 나눈 값인 식 (4a)와 같이 정의하였다.

$$\hat{P} = P/V_{rr}, \tag{4a}$$

$$P = \frac{2\pi\mu_k}{\tau_1(t_f - t_0)} \int_{t_0}^{t_f} F_N(t) dt, \tag{4b}$$

$$V_{rr} = \frac{2\pi R_2 v_f}{t_f - t_0} \int_{t_0}^{t_f} (\delta_s + \delta_d) dt. \tag{4c}$$

여기서 t_0 와 t_f 는 파워 및 MRR을 계산하기 위해 설정한 시간 영역을, R_2 는 가공물의 반지름을, F_N 은 식 (2a)와 (2b)에서 시리즈로 전개한 연삭력을 나타낸다. 그리고 μ_k 는 연삭 슷돌과 가공물 사이의 동적 마찰계수로, Cai¹⁰의 연구결과를 토대로 고속 회전하는 본 시스템에 대하여서는 0.1의 값을 사용하였다.

식 (4a)에서 정의한 가공 에너지 밀도를 계산하기 위해서, 우리는 Fig. 2의 안정한 부분과 불안정한 부분을 구분하여 살펴볼 필요가 있다. 왜냐하면 안정 영역에서의 시스템의 거동은 진폭이 0으로 수렴하는 경우만 존재하는 반면, 불안정한 영역에서의 거동은 진폭이 무한대의 크기로 발산하거나 (Sub-critical bifurcation), 시스템의 비선형성으로 인해 일정 크기의 진폭을 갖는 Limit cycle이 나타나는 등 (Super-critical 또는 Fold bifurcation) 운전 조건에 따라 다르게 나타나기 때문이다.

따라서 다음의 3.1절에서는 선형 시스템의 안정 영역에서 구한 가공 에너지 밀도에 대해 고찰하고, 3.2절에서는 시스템의 비선형성을 고려하여

불안정 영역에서 구한 가공 에너지 밀도에 대한 토론을 할 예정이다.

3.1 안정 영역

전술한 바와 같이 안정 영역의 경우 시스템의 동적 거동은 사라지고, 이로 인해 연삭 슷돌과 가공물 사이에 작용하는 마찰력은 정적 수직 연삭력으로만 정의된다. 따라서 마찰력의 파워는 Fig. 3(a)와 같이 Initial feed가 클수록 커지는 단순한 경향을 보이게 된다. 하지만 Initial feed가 클수록 MRR은 비선형 (Super-linear)으로 증가하기 때문에 가공 에너지 밀도는 Fig. 3(b)와 같이 Initial feed가 클수록 작아지는 경향을 보여준다. 한편, 연삭 슷돌의 회전 속도가 증가할수록 대체로 가공 에너지 밀도는 증가하는 경향을 보이지만, 선형 안정 경계면 근처의 경우, 즉 약 9000 RPM 부근에서 소폭 하락하는 모습을 보여준다. 하지만 경계면으로부터 떨어진 영역에서의 가공 에너지 밀도가 월등히 작기 때문에 최적의 운전 조건은 연삭 슷돌의 회전 속도가 낮고 Initial feed가 큰 영역에서 나타난다.

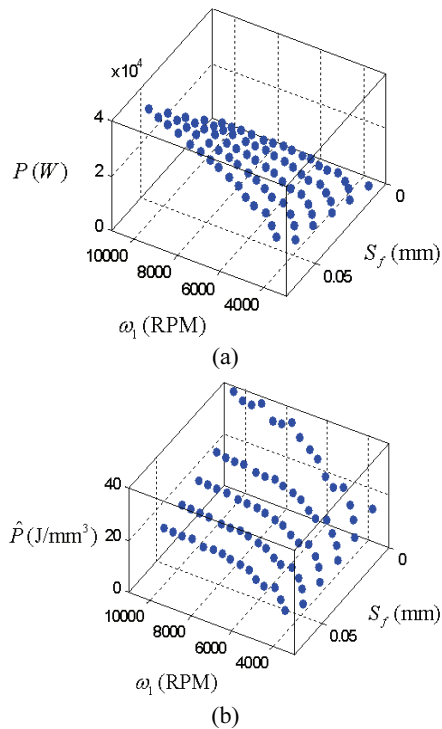


Fig. 3 (a) Grinding power variations in stable region (b) Grinding energy density variations in stable region

3.2 불안정 영역 (Stable limit cycle)

불안정 영역에서 발생하는 Limit cycle 형태의 chatter 진동이 발생하는 운전 조건을 구하기 위해서, 우선적으로 Supercritical Hopf bifurcation 지점 ($\omega_1 = 7000\text{RPM}$, $\omega_2 = 3000\text{RPM}$) 과 Cyclic fold bifurcation ($\omega_1 = 7000\text{RPM}$, $\omega_2 = 8000\text{RPM}$) 지점에서 발생하는 Stable limit cycle 을 Harmonic balance method (HBM) 를 이용하여 찾아내는 수치해석 과정을 수행하였다.

이를 위해 식 (2a)와 (2b)의 정상상태의 주기해를 기본주파수 ω_0 를 갖는 조화 함수들의 선형 조합으로 다음과 같이 나타내었다.

$$x_p(t) = \sum_{n=0}^N a_{xn} \cos(n\omega_0 t) + b_{xn} \sin(n\omega_0 t), \quad (5a)$$

$$y_p(t) = \sum_{n=0}^N a_{yn} \cos(n\omega_0 t) + b_{yn} \sin(n\omega_0 t). \quad (5b)$$

여기서 $a_{xn}, a_{yn}, b_{xn}, b_{yn}$ ($n=1..N$) 은 Fourier coefficient 들을 나타내고, 편의상 b_{x1} 은 0으로 설정하였다. 식 (5a)와 (5b)를 식 (2a)와 (2b)에 대입하면 Fourier coefficient들을 구할 수 있고, 이를 통해 Limit cycle 형태의 chatter 진동이 발생하는 운전 조건을 구할 수 있다.

이렇게 구한 Limit cycle에서, Fundamental harmonic amplitude인 a_{x1} 에 대한 가공 에너지 밀도를 구하였고, Fig. 4(a)는 Hopf bifurcation 지점에서의 결과를, Fig. 4(b)는 Cyclic fold bifurcation 지점에서의 가공 에너지 밀도의 변화를 나타낸다. 단, 일정 진폭 이상의 진동이 발생할 경우 연삭 슷돌과 가공물 사이의 접촉이 끊어지게 되는데, 이러한 경우는 본 연구의 관심 범위를 벗어나기 때문에 본 연구에서는 배제하였다.

Fig. 4에서 나타나듯이 두 경우 모두 초기에는 진폭이 증가함에 따라 가공 효율이 좋아지는 것을 확인할 수 있는데, 이를 통하여 선형 시스템의 불안정 영역에서도 최적의 운전 조건을 찾을 수 있음을 알 수 있다. 앞서 언급했듯이 Fig. 4는 접촉이 유지되는 영역에 대해서 얻은 결과이므로 Fig. 4(a)의 경우 최적의 운전 조건은 접촉이 끊어지기 직전이 될 것으로 판단된다. 반면에 Fig. 4(b)의 경우 진폭이 증가함에 따라 비선형 적으로 증가하던 파워와 MRR 곡선이 교차하게 되어 가공 에너지 밀도 곡선의 기울기가 역전되는 모습을 볼 수 있다. 이 경우 최적의 운전 조건은 기울기가 0 이고 진폭이 약 $0.25 \mu\text{m}$ 인 지점이 될 것으로 예측된다.

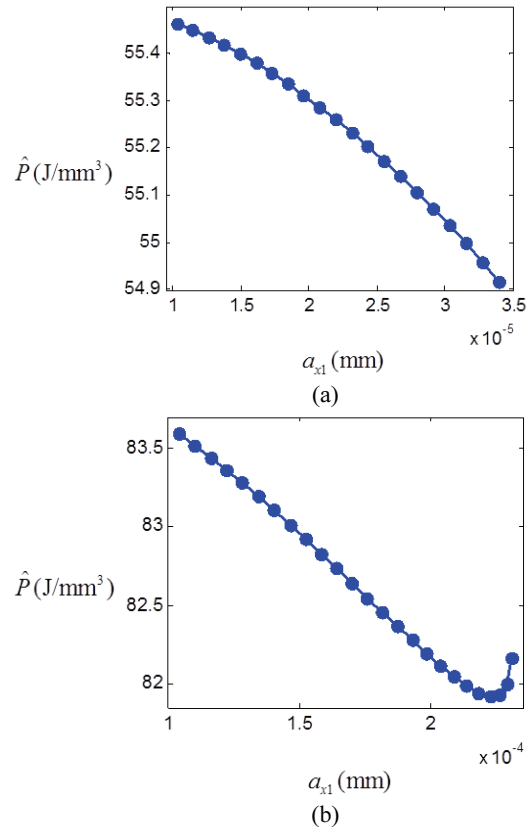


Fig. 4 (a) Energy density variations following the limit cycle points generated from a super-critical Hopf bifurcation point (b) Energy density variations following the limit cycle points generated from a cyclic fold bifurcation point

4. 결론

본 논문에서는 비선형 원통 외경 연삭 시스템의 가공 에너지 밀도를 이론적으로 계산하여 최적의 운전조건을 찾는 연구를 수행하였다. 이를 위하여 비선형 식을 선형화 하여 선형 안정 영역도를 도출하였고, 이를 바탕으로 안정 영역과 불안정 영역 (Stable limit cycle)에서 최적의 운전 조건을 찾는 과정을 수행하였다. 그 결과 선형 안정 영역에서는 Initial feed와 연삭 슷돌의 회전 속도가 클수록 가공 에너지 밀도가 작아지는 경향을 보였고, 불안정 영역에서는 Supercritical Hopf bifurcation과 Cyclic fold bifurcation 지점으로부터 발생하는 Limit cycle 지점에서 주위보다 낮은 에너지 밀도를 갖는 운전조건을 찾을 수 있었다.

후 기

본 논문은 지식경제부 산업융합원천기술개발사업으로 지원된 연구결과입니다. [10042651, 에너지 소비량 10% 이상 저감된 5축 머시닝센터 기반 복합가공기 개발].

참고문헌

1. Meadows, D., Meadows, D., and Randers, J., "Limits to Growth," Universe books, 1972.
2. European Commission, http://ec.europa.eu/enterprise/eco_design/workingplan.htm
3. Park, C., Kwon, K., Kim, W., Min, B., Park, S., Sung, I., Yoon, Y., Lee, K., Lee, J., and Seok, J., "Energy Consumption Reduction Technology in Manufacturing – A Selective Review of Policies, Standards, and Research," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 10, No. 5, pp. 151-173, 2009.
4. 2012 Handbook of energy statistics.
5. Werner, G., "Influence of Work Material on Grinding Forces," Annals of the CIRP, Vol. 27, No. 1, pp. 243-248, 1978.
6. Inasaki, I., Karpuschewski, B., and Lee, H. S., "Grinding Chatter-Origin and Suppression," CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol. 50, No. 2, pp. 515-534, 2001.
7. Grach, K., Pai, D. M., Ratterman, E., and Shaw, M. C., "Grinding Forces and Energy," American Society of Mechanical Engineers, New York, 1987.
8. Kim, P., Jung, J., Lee, S., and Seok, J., "Stability and Bifurcation Analyses of Chatter Vibrations in a Nonlinear Cylindrical Traverse Grinding Process," Journal of Sound and Vibration, In press.
9. Chung, K. W. and Liu, Z., "Nonlinear analysis of chatter vibration in a cylindrical transverse grinding process with two time delays using a nonlinear time transformation method," Nonlinear Dynamics, Vol. 66, pp. 441-456, 2011.
10. Cai, G. Q., Feng, B. F., Jin, T., and Gong, Y. D., "Study on the Friction Coefficient in Grinding," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 129, pp. 25-29, 2002.