

공작기계 구동장치의 에너지 소비 모델에 대한 연구

박현웅, 이정원, 설원규, 정세교
경상대학교

A Study on Energy Consumption Model for Driving Systems of Machine Tools

HyeonWoong Park, JeongWon Lee, Won-Kyu Seol, Se-Kyo Chung
Gyeongsang National University

Abstract

The motor used as a drive in machine tools is the largest part of energy consumption. Therefore, it is essential to optimize the energy consumption of the motor to improve the energy efficiency of machine tools. In this paper, the energy consumption model of motor drives is derived from the operating conditions of machine tools. The validity of the derived model is verified through the experiments.

1. 서론

공작기계는 산업현장에서 큰 에너지 소비 원 중의 하나이며, 이에 따라 유럽과 미국 등 전세계적으로 환경규제에 대응하기 위한 공작기계의 에너지 저감기술이 이슈화되고 있다. 이를 위해 선진국의 공작기계업체 및 대학에서는 공작기계 에너지 효율 향상을 위한 다양한 기술과 사용자 친화적인 에너지 모니터링 및 관리 기능을 개발하여 제품화하고 있다.

공작기계에서 스핀들 및 이송계를 구성하는 전동기는 주 에너지 소비 원이며 효율 향상을 위해서는 전동기의 에너지 소비절감이 필수적이다. 즉, 구동장치의 에너지 소비모델 이용한 에너지 소비예측 그리고 이를 활용한 가공경로 및 조건의 최적화를 통해 에너지 소비를 최적화할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 공작기계의 스핀들과 이송계를 구성하는 전동기 및 구동장치의 에너지 소비모델을 유도하고 실험을 통해 검증하였다.

2. 공작기계 구동장치의 소비 에너지 모델

공작기계의 에너지 소비 저감 제어의 개념은 가공품을 만들기 전 가공계획을 수립하고 가공계획과 에너지 소비 모델을 이용하여 에너지 소비를 예측하며, 이를 이용하여 에너지의 소비가 최적화된 가공경로 및 조건을 가공품을 만드는데 적용하여 에너지 소비 저감하는 것이다.

따라서 공작기계에서 주어지는 운전조건과 시간을 이용하여 스핀들 및 이송계 구동장치의 에너지 소비모델을 도출한다.

2.1 스핀들 전동기의 에너지 소비 패턴 및 모델

그림 1은 스핀들 전동기의 속도 프로파일 및 토크를 나타낸다. 스핀들 전동기는 속도제어 루프를 가지며, 동작 패턴은 가속 - 무부하 구동 (Idling) - 일정부하 구동 (가공) - 무부하 구동 (Idling) - 감속 과정으로 운전하며 이를 바탕으로 주축 모터에서 소비되는 에너지는 다음과

같이 나타낼 수 있다.

$$p_{acc} = J \frac{d\omega_m}{dt} \omega_m + B\omega_m^2 + P_e \quad (1)$$

$$p_{idle} = B\omega_m^2 + P_e \quad (2)$$

$$p_L = T_L \omega_m + B\omega_m^2 + P_e \quad (3)$$

$$P_e = I_{a,rms}^2 R_a + I_{b,rms}^2 R_b + I_{c,rms}^2 R_c \quad (4)$$

여기서, p_{acc} 는 가속 시 소모전력, p_{idle} 는 공회전 시 소모전력, p_L 은 가공 시 소모전력, P_e 전기적 손실이며 감속 시 소비 에너지는 음의 값으로 에너지가 회생되며, 에너지 회생장치가 없는 서보 드라이브의 경우, 이 값은 영 ($E_{dec}=0$)으로 볼 수 있다. 따라서 스핀들 전동기에서 소비되는 에너지는 다음과 같다.

$$E_{sp} = E_{acc} + E_{idle} + E_L + E_{dec} \quad (5)$$

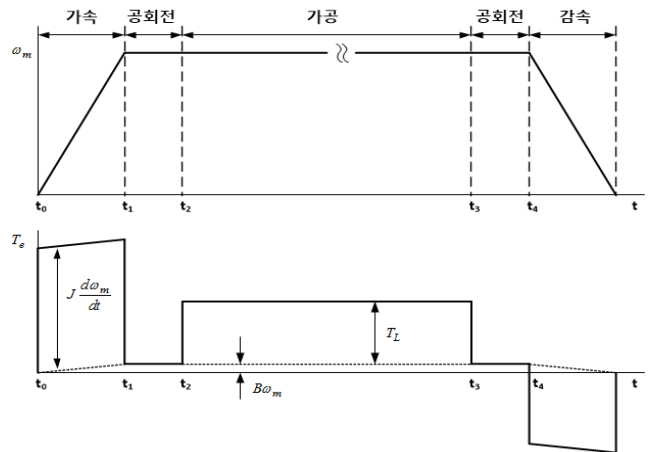


그림 1 스핀들 전동기의 운전 프로파일

2.2 이송축 전동기의 에너지 소비 패턴 및 모델

그림 2는 이송축 전동기의 운전 프로파일을 나타낸다. 이송축 전동기는 위치제어 루프를 가지며 가속 - 정속 - 감속의 과정으로 운전되며 이를 바탕으로 이송축 전동기에서 소비되는 에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_{acc} = J \frac{d\omega_m}{dt} \omega_m + B\omega_m^2 + P_e \quad (6)$$

$$p_{const} = T_L \omega_m + B\omega_m^2 + P_e \quad (7)$$

$$P_e = I_{a,rms}^2 R_a + I_{b,rms}^2 R_b + I_{c,rms}^2 R_c \quad (8)$$

여기서, p_{acc} 는 가속 시 소모전력이며, p_{const} 은 정속 시 소

모전력, p_e 은 전기적 손실이다. 스핀들 전동기와 마찬가지로 감속 시 소비에너지는 영($E_{dec}=0$)으로 가정하였다. 따라서 이송축 전동기에서 소비되는 에너지는 다음과 같다.

$$E_{sv} = E_{acc} + E_{const} + E_{dec} \quad (9)$$

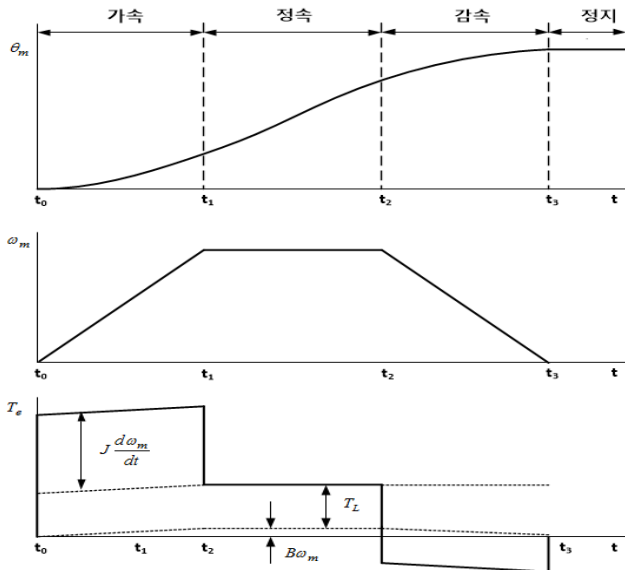


그림. 2 이송축 전동기의 운전 프로파일

3. 실험 결과

그림. 3은 에너지 소비모델의 타당성을 검증하기 위한 실험 시스템이며 서보 전동기와 드라이버, 그리고 에너지 소비 측정을 위한 계측장치로 구성되어 있다.

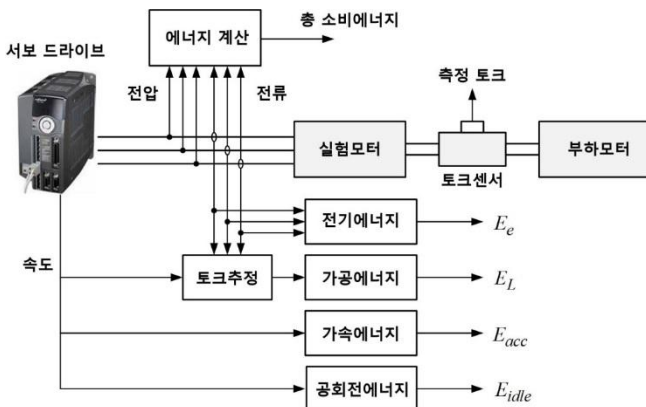


그림. 3 서보 전동기의 실험 시스템구성

구동장치의 에너지 소비 모델을 검증하기 위해 여러 가지 시나리오에 대한 실험을 수행하고 그 결과 값을 모델을 이용하여 계산된 에너지 소비량과 비교하였다. 표. 1은 실험조건을 나타내고 있으며 표 2는 각 조건에 대한 실험 결과이다.

실험조건 1~3은 구동장치의 점성마찰계수 (B) 등과 같은 불확실한 파라미터들을 추정하기 위한 운전조건으로 무부하 운전을 통해 이들 파라미터를 추정하고 이를 이용하여 가공 시 에너지 소비를 계산한다.

실험 4~6의 결과를 보면 최대 10% 이내의 오차로 에너지 소비를 추정 할 수 있음을 알 수 있다.

표. 1 에너지소비 측정 시나리오

실험 조건	속도	부하	가속 시간	정속 시간	감속 시간
1	1000rpm	0	0.5s	19.5s	0.5s
2	2000rpm	0	1.0s	19s	1.0s
3	2500rpm	0	1.25s	18.75s	1.25s
4	1000rpm	1.0	0.5s	19.5s	0.5s
5	2000rpm	1.5	1.0s	19s	1.0s
6	2500rpm	1.75	1.25s	18.75s	1.25s

표. 2 에너지소비 계산 및 측정결과

실험 조건	모델 계산 에너지 (J)				측정 에너지 (J)	오차 (%)
	가속	부하 외	부하	합계		
1	12.4	609.5	0	621	622	-
2	48.4	1,547.4	0	1,596	1,598	-
3	75.3	2,095.9	0	2,151	2,159	-
4	12.9	803.6	1,998.7	2,805	3,108	9.7%
5	51.5	2,295.8	5,652.0	7,999	7,988	1.4%
6	80.8	3,173.9	7,784.6	11,039	10,800	2.2%

그림. 4는 직접 개발한 에너지 소비측정 시스템의 측정값을 나타낸 그래프이며 이 시스템을 통해 동작기계의 가공 중 소비전력 및 에너지 측정된 값을 알 수 있으며 모델에서 계산된 에너지 값이 각 실험조건에서 10%미만의 오차를 가지고 있음을 확인하였다.

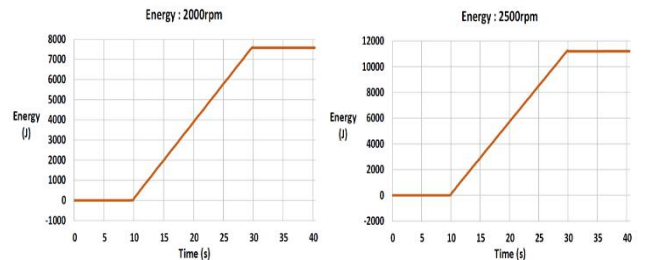


그림. 4 개발된 에너지 소비측정 시스템에서 측정 값 (실험조건 5,6)

4. 결론

본 논문에서는 동작기계 구동장치의 에너지 소비모델을 유도하고 운전 프로파일로부터 가공 시 구동장치의 소비 에너지를 예측하였다. 그리고 실험을 통하여 유도된 모델의 타당성을 검증 하였다. 유도된 에너지 소비 모델은 앞으로 동작기계에 에너지 소비 저감 시스템에 활용 될 수 있을 것이다.

이 논문은 한국산업기술평가관리원의 산업핵심기술개발 사업 (과제번호: 10062938)의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

[1] Y. Zhu, H. Chen, and H. Mu, "A novel approach of tuning trapezoidal velocity profile for energy saving in servomotor systems," in Proc. 34th Chin. Control Conf., 2015, pp. 4412-4417.