

◆ 특집 ◆ 공작기계의 소비 에너지 절감기술

공작기계 냉각시스템의 에너지 절감 알고리즘

Energy Saving Algorithms for Cooling Systems in Machine Tools

김태정¹, 김태호¹, 지성철^{1,✉}
Taejung Kim¹, Taeho Kim¹, and Sungchul Jee^{1,✉}

1 단국대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Dankook University)

✉ Corresponding author: scjee@dku.edu, Tel: +82-31-8005-3504

Manuscript received: 2015.3.9. / Revised: 2015.3.18. / Accepted: 2015.3.19.

Machine tools usually consume more energy in cooling systems than in spindle motors. This is largely because circulation pumps in the cooling systems are continuously powered to measure the temperature of spindle motors. In this paper, energy saving algorithms are proposed, which modify this behavior of the circulation pumps in such a way that the circulation pumps run only when it is likely that the information on the temperature is critical to bang-bang control of compressors in cooling systems. A mathematical model is established that explains heat transfer phenomena near the spindle motors. The power consumptions are measured for individual components in a machine tool, and the parameters that appear in the mathematical model are estimated. Computer simulations are performed with the estimated parameters, and the results are compared with the experimental ones. It turns out that a large amount of energy can be saved by using the proposed method.

KEYWORDS: Machine tool (공작기계), Cooling system (냉각시스템), Energy saving algorithm (에너지 절감 알고리즘)

1. 서론

국제적으로 원유가격의 불안정세가 지속되고 있고 환경규제 정책이 확산되고 있다. 2009년부터 탄소성적표지제도가 국내에서 시행되어 기업들의 자발적 참여가 확산되고 있다.¹ 2010년 프랑스에서 탄소성적표지(carbon labeling) 의무화 법안이 최초로 통과된 이후에는 탄소성적표지제도가 국제적으로 더욱 확산되고 있다.² 탄소표지제도 의무화가 일반화된다면 무역장벽으로 작용할 수 있어 국내 제조업 및 산업용 기계산업의 경쟁력 확보를 위하

여 제조업 전반의 에너지 효율을 향상시키는 것이 시급한 과제로 대두되고 있다.

국내 산업별 전력 소비량을 Fig. 1에 나타내었다.³ 제조업에서 50% 이상이 소비되는 것으로 나타나 국내 산업에서 제조업의 비중이 높은 것을 알 수 있다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 국내 산업 용 에너지 가격이 2000년도 이후 상승하고 있고 앞으로도 상승세가 지속될 것으로 전망된다.⁴ 에너지 가격의 상승은 제조 원가 상승의 직접적 원인으로 작용하므로 국내 제조업의 가격경쟁력을 유지하기 위하여 산업기계의 에너지 절감 기술을 확

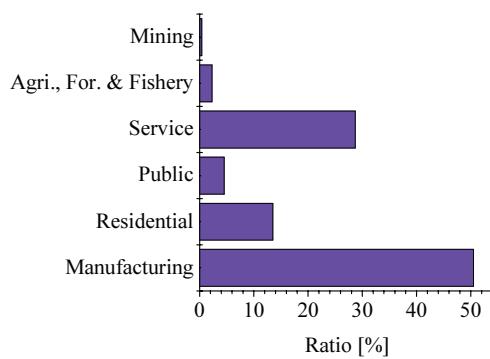


Fig. 1 Power sales of Korean industry sectors

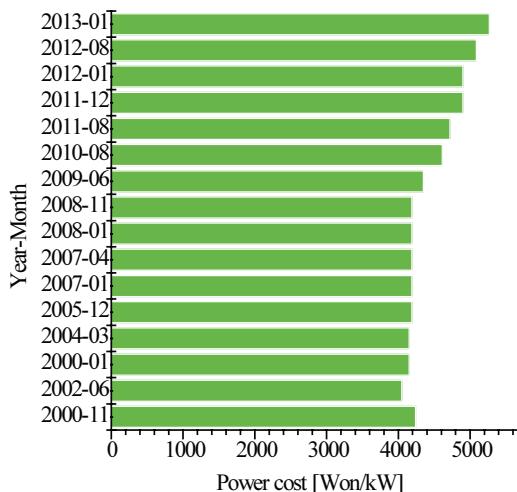


Fig. 2 Trends in industrial energy costs in Korea

보하는 것이 필요하다.

머시닝센터는 대표적인 산업기계로서, 자동차, 항공, 조선 및 IT산업 등으로 대표되는 국내 제조업에서 중요도가 높은 생산요소이다. Fig. 3에 나타낸 Mori Seiki사의 머시닝센터 소비에너지 분석자료에 의하면,⁵ 냉각 관련 장치의 에너지 소비수준이 약 54%로 절삭에 소비되는 10% 수준보다 높은 것으로 나타나, 냉각 관련 주변장치의 에너지 소비 수준을 낮출 필요가 있음을 알 수 있다. 하드웨어 자체의 에너지 효율을 향상시키는 방안과,⁶ 소프트웨어적으로 에너지 관리 시스템을 도입하는 방안이^{5,7,9} 머시닝센터의 에너지 소비 효율을 향상시키기 위한 방안으로 제시되고 있다.

본 논문에서는 냉각 관련 장치 중 주축 냉각시스템의 소프트웨어적인 소비에너지 절감 방안을 제시한다.

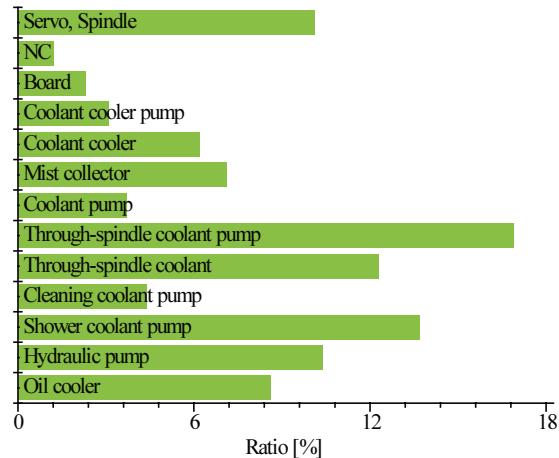


Fig. 3 Energy consumption of a machining center

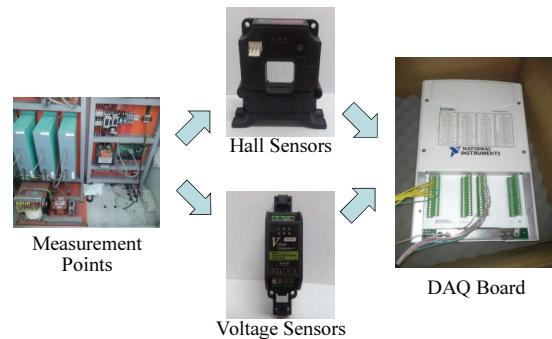


Fig. 4 Experimental setup

2. 머시닝센터 냉각시스템의 소비전력

남선기공의 머시닝센터 SPHINX-5X/65 단자함내에 Fig. 4와 같이 전압 및 전류 센서를 설치한 후, 머시닝센터를 구성하는 개별 장치의 소비전력을 DAQ 보드를 통해 파악하였다. 3상 4선식의 전원이 해당 머시닝센터에 공급되므로 식(1)을 이용하여 Y 결선에서 소비되는 유효전력(active power) P 를 계산하였다.

$$P = \frac{1}{T_0} \int_t^{t+T_0} [V_R(t)I_R(t) + V_S(t)I_S(t) + V_T(t)I_T(t)] dt \quad (1)$$

여기서 V_R , V_S , V_T 는 중성선에 대한 각 상의 전압, I_R , I_S , I_T 는 각 상의 전류, T_0 는 공급 전압의 주기를 나타낸다.

해당 머시닝센터의 주축, 이송축, 칩스크류, 칩전베이어, 공구 교환기를 개별적으로 작동시키며 소

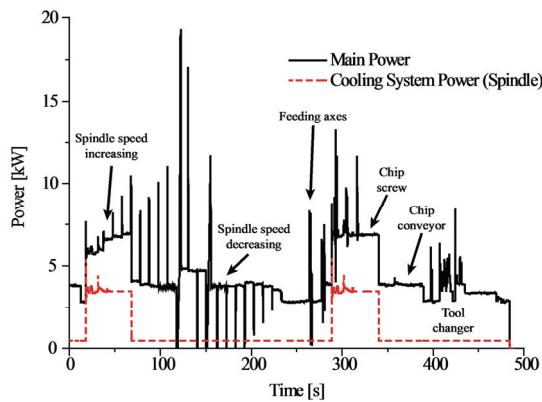


Fig. 5 Energy consumption of SPHINX-5X/65

비전력을 측정하여 Fig. 5에 나타내었다. 측정 결과에 따르면 주축이 작동하지 않는 시점에도 냉각시스템의 순환펌프가 지속적으로 작동하여 약 0.5 kW 수준의 전력이 소비되었음을 알 수 있다. 이는 해당 머시닝센터 전체 소비전력의 약 16%를 차지한다.

가공 시에는 냉각수 온도에 따라 압축기의 동작이 단속적으로 제어되고 주축이 작동하지 않는 비가공시간 동안에는 주축 베어링과 모터에서 열이 발생하지 않으므로 주축이 냉각될 필요가 없다. Fig. 5에 나타낸 측정 결과를 통해 알 수 있는 바와 같이, 기존 냉각시스템에서는 머시닝센터의 동작 상태에 상관없이 순환펌프가 지속적으로 작동한다.

3. 비가공 시 냉각시스템의 에너지 절감

비가공시간은 예측 가능한 요인과 예측 불가능한 요인에 의해 발생할 수 있다. 1일 작업 종료 시점과 1일 작업 개시 시점 사이의 비가공시간이 예측 가능한 요인의 대표적 예가 될 수 있다. 비가공시간이 예측 가능하다면 예약 시점에 가공이 개시될 수 있는 상태로 개별 장치가 대기하게 함으로써 에너지를 절감할 수 있다.¹⁰

본 장에서는 예측 불가능한 요인에 의해 발생한 비가공시간 동안 개별 장치가 가공준비상태를 유지하며 소비에너지를 절감할 수 있는 방안을 제시한다. 비가공시간 동안 주축이 작동하고 있지 않다면 자연냉각에 의해 냉각되므로, 가공준비상태를 유지하기 위해 예열이 필요하다. 주축을 저속으로 작동시켜 윤활유를 공급한 후 고속으로 작동시킴으로써 열변형에 의한 가공오차를 방지하는 것이 예열작업의 목적이다.

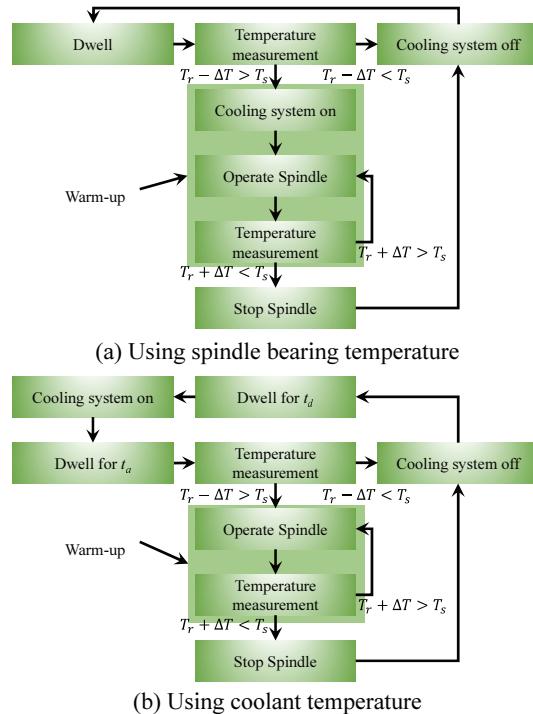


Fig. 6 Energy saving algorithms

Fig. 6에 냉각시스템의 소비에너지를 절감하며 주축의 온도를 일정하게 유지함으로써 가공준비상태를 유지시키는 알고리즘을 제시하였다. 주축 베어링에 설치된 온도 센서 신호를 활용할 수 있는 경우와 냉각수 온도를 통해 주축부의 온도를 추정하여 제어시스템의 궤환 신호로 활용하는 경우로 나누어 제시한다.

Fig. 6(a)에 주축 베어링의 센서를 사용하는 뱅뱅 제어법을 제시하였다. 요구되는 주축의 온도 T_r 및 그 범위 ΔT 를 머시닝센터에 입력하고 주축의 온도 T_s 가 하한값 $T_r - \Delta T$ 보다 낮다면 상한값 $T_r + \Delta T$ 에 도달할 때까지 주축과 냉각시스템을 작동시킨다. 이후 주축 온도가 하한값에 도달할 때까지 주축 및 냉각시스템의 전원을 차단한다. 이 때, 주축과 냉각수의 온도차를 줄이기 위해 주축뿐만 아니라 냉각시스템도 함께 동작시켜 예열의 효과를 유지하여야 한다.

Fig. 6(b)에는 냉각수 온도를 사용하는 알고리즘이 제시되어 있다.¹¹ 냉각수가 압축기를 통한 열교환에 사용될 뿐만 아니라 주축의 온도 측정에도 사용되므로 주축의 온도가 설정된 하한값보다 높을 때에도 순환펌프가 온도 측정을 위해 단속적으

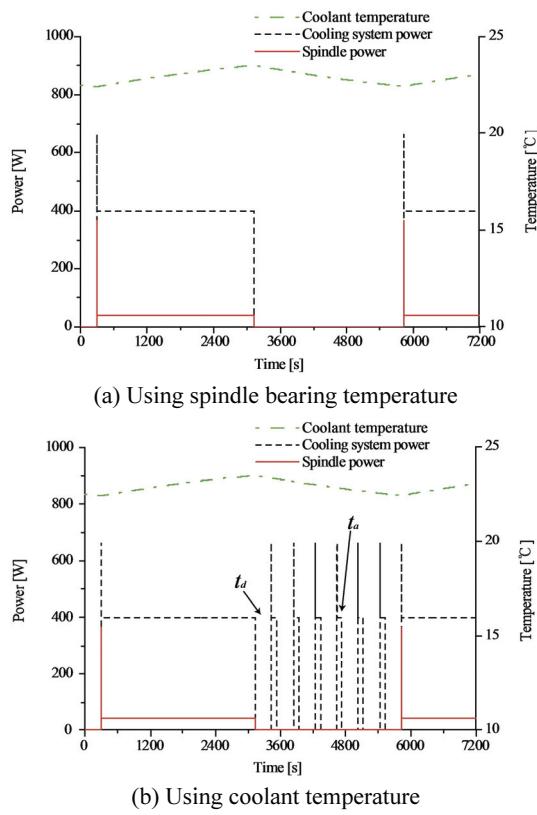


Fig. 7 Simulation results of energy saving algorithms

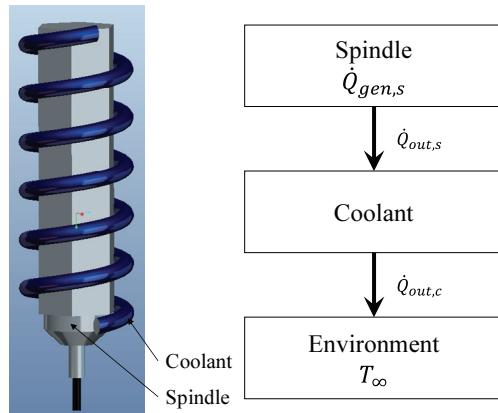


Fig. 8 Heat transfer near a spindle

4. 가공 중 냉각시스템의 에너지 절감

가공 중 주축의 과열로 인한 베어링 및 모터의 파손을 방지하고 가공정밀도를 유지하는 것이 냉각시스템의 역할이다. 냉각수의 온도를 측정하여 냉각시스템에 입력된 온도보다 냉각수의 온도가 높으면 압축기가 작동하여 주축을 냉각시키고, 냉각수의 온도가 입력된 온도보다 낮아지면 압축기가 정지하면서 냉각이 종료되는 것이 기존 냉각시스템의 작동방식이다. 기존 방식의 단점은 주축의 온도에 상관없이 순환펌프가 지속적으로 작동하여 에너지를 낭비하는 것이다. 본 장에서는 NC 데이터를 분석하여 예측한 주축의 온도거동에 따라 냉각시스템의 작동을 제어하는 알고리즘을 제시한다.

압축기의 작동 없이 순환펌프만 가동할 때 주축 베어링과 모터저항에서 발생한 열이 대기중으로 방출되는 열전달 현상을 Fig. 8과 같이 과도현상이 표현될 수 있는 최소한의 형태로 모델링하여 식(3)과 식(4)에 나타내었다.

$$C_{m,s} \frac{dT_s}{dt} = \dot{Q}_{gen,s} - \dot{Q}_{out,s} \quad (3)$$

$$C_{m,c} \frac{dT_c}{dt} = \dot{Q}_{out,s} - \dot{Q}_{out,c} \quad (4)$$

여기서, $\dot{Q}_{gen,s}$ 는 주축의 열발생률, $\dot{Q}_{out,s}$ 는 주축으로부터 냉각수로의 열전달률, $\dot{Q}_{out,c}$ 는 냉각수로부터 외부로의 열전달률, $C_{m,s}$ 및 $C_{m,c}$ 는 주축 및 냉각수의 비열, T_s 는 주축의 온도, T_c 는 냉각수의 평균온도이다. 이때, 열전달률 $\dot{Q}_{out,s}$ 와 $\dot{Q}_{out,c}$ 를 식(5)과 식(6)의 형태로 표현할 수 있다.

Table 1 Input parameters

T_∞	T_r	ΔT	
21°C	23°C	0.5°C	
t_a	t_d	\dot{Q}_{gen}	C_m / Ah
100 s	300 s	50 W	4862 s

로 작동되는 것이 베어링 온도센서를 이용한 Fig. 6(a)의 알고리즘과의 차이점이다. 요구되는 주축의 온도 및 그 범위 외에 순환펌프의 작동기간 t_a 및 정지기간 t_d 가 추가로 입력될 필요가 있다.

제시된 두 알고리즘을 적용한 시뮬레이션의 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 시뮬레이션에 사용된 파라미터를 Table 1에 제시하였고 주축의 온도거동을 식(2)와 같이 1차 시스템으로 표현하였다.

$$C_m \frac{dT}{dt} + Ah(T - T_\infty) = \dot{Q}_{gen} \quad (2)$$

여기서, C_m 은 주축의 비열, A 는 시스템의 유효단면적, h 는 대류열전달계수이다.

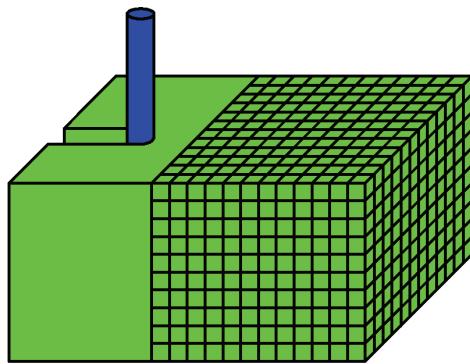


Fig. 9 Voxelization for computing MRRs

$$\dot{Q}_{out,s} = A_s h_s (T_s - T_c) \quad (5)$$

$$\dot{Q}_{out,c} = A_c h_c (T_c - T_\infty) \quad (6)$$

여기서, $A_s h_s$ 는 주축과 냉각수간 열교환 상수, $A_c h_c$ 는 냉각수-외부간 열교환 상수, T_c 는 외부온도이다. 주축의 열발생률 $\dot{Q}_{gen,s}$ 를 베어링에서의 마찰에 의한 열발생률 P_f 와 모터 저항에서의 열발생률 P_R 로 나누어 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{Q}_{gen,s} = P_f + P_R \quad (7)$$

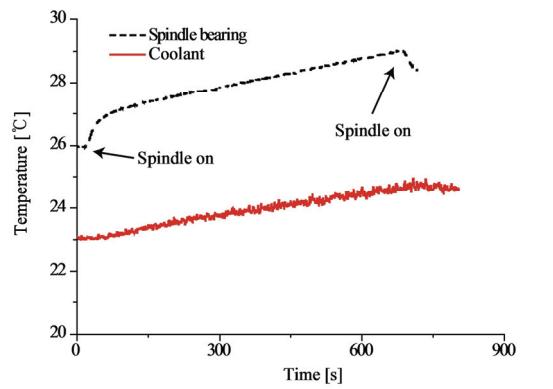
주축을 무부하 상태로 운전하면서 주축의 소비에너지를 측정하여 마찰에 의한 열발생률 P_f 를 알 수 있다. P_f 는 주축의 회전수에 의존하는데 측정에 의하면 해당 기계의 주축이 1000 rpm으로 회전 시 약 50 W로 나타났다. 모터 저항에 의한 열발생률 P_R 은 식(8)과 같이 표현된다고 가정하였다.

$$P_R = \alpha(\omega, MRR)P_c \quad (8)$$

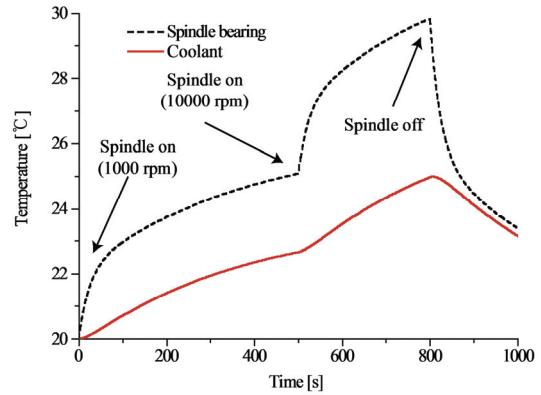
여기서, P_c 는 절삭동력, MRR은 절삭 시 소재제거율(material removal rate)이고, α 는 발열계수를 나타낸다. 발열계수는 주축의 회전속도 ω 와 소재제거율의 함수로 주축 모터의 효율과 관련이 있다.¹² 주축의 절삭동력 P_c 는 식(9)에 따라 계산하였다.

$$P_c = u \times MRR \quad (9)$$

여기서, u 는 비절삭에너지(specific cutting energy)이고 공작물 및 공구를 Fig. 9와 같이 복셀화(voxelization)하여 단위 시간 당 제거되는 복셀(voxel)의 수를 계수함으로써 소재제거율을 계산할 수 있다.



(a) Measured temperature of spindle bearings and coolant



(b) Temperature response by simulation

Fig. 10 Temperature behavior of a cooling system

Fig. 10(a)는 주축을 10000 rpm으로 작동시켜 주축 베어링 및 냉각수 온도를 측정한 결과이고, Fig. 10(b)는 식(3)과 식(4)에 $C_{m,s} = 900 \text{ J}/\text{°C}$, $C_{m,c} = 9000 \text{ J}/\text{°C}$, $A_s h_s = 25 \text{ J/s °C}$, $A_c h_c = 35 \text{ J/s °C}$ 로 설정하고 압축기가 동작하지 않는 경우를 시뮬레이션하여 주축 베어링 및 냉각수의 온도거동을 나타낸 것이다. 두 그래프의 온도상승의 형태가 유사하게 나타난 것으로 보아 Fig. 8에 나타낸 주축의 온도거동에 관한 열전달 모델이 정성적으로 타당함을 알 수 있다.

발열계수가 16% 수준인 기계를 사용하여 Fig. 11과 같이 소재제거율이 변동하는 공구경로를 따라 비절삭에너지가 $17 \text{ W} \cdot \text{min}/\text{cm}^3$ 인 피삭재를 2000 rpm으로 밀링 가공하는 경우에 대하여 Fig. 10(b)의 파라미터를 적용한 시뮬레이션 결과를 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12의 주축 냉각수의 온도거동 그래프를 관찰하면, 주축 베어링 및 냉각수의 온도가 상승하여 압축기가 가동되는 시점과 냉각

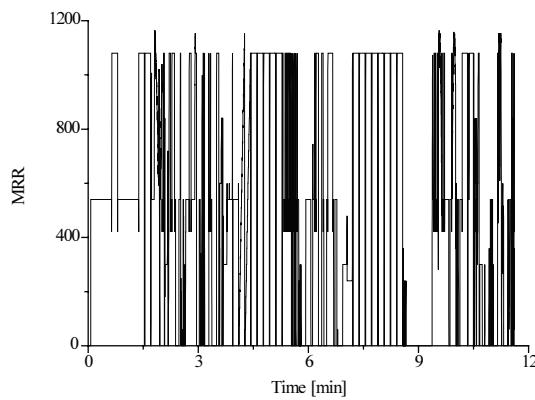
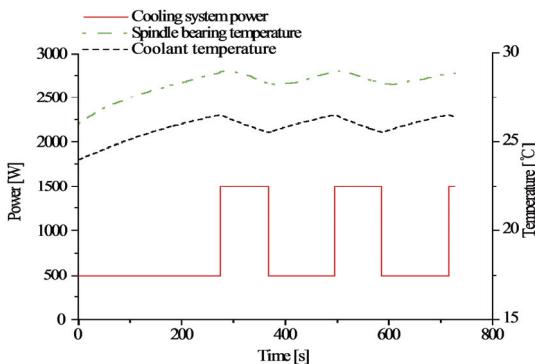
Fig. 11 MRR in the cutting simulation (unit: mm^3/min)

Fig. 12 Thermal response of a cooling system without controlling circulation pumps

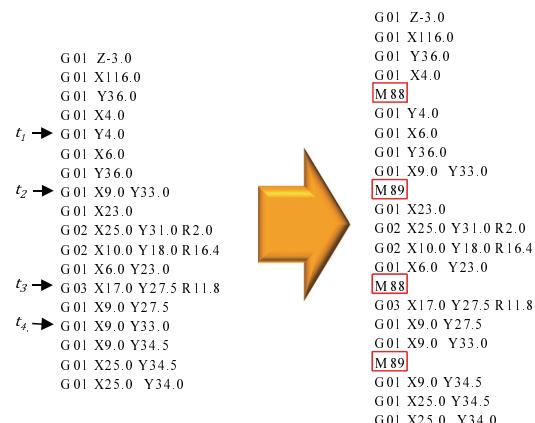


Fig. 13 Example of generated NC data

이 완료되어 압축기가 정지하는 시점을 파악할 수 있다. Fig. 13에 나타낸 예와 같이, 압축기가 가동하기 전에 냉각시스템 작동 M코드, 예를 들어 M88을

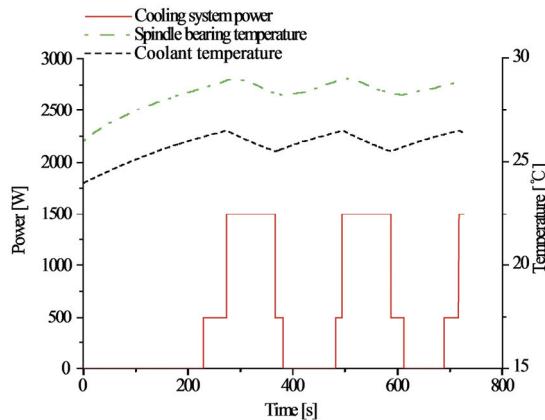


Fig. 14 Simulated response of a cooling system using the NC data with developed M-codes

삽입하고, 냉각이 완료된 후에 냉각시스템 정지 M 코드를 삽입하여 새로운 NC데이터를 생성한다.

Fig. 12의 시뮬레이션과 동일한 조건에서 작동 및 정지 M 코드가 삽입된 NC데이터를 이용하여 가공할 때 주축 베어링 및 냉각수의 온도거동과 냉각시스템의 에너지 소비패턴을 예측하여 Fig. 14에 나타내었다. Fig. 12의 결과와 비교하였을 때, 냉각시스템 순환펌프만 작동되는 구간에서의 소비에너지가 절감됨을 알 수 있다.

5. 결론

머시닝센터 냉각시스템의 소비에너지를 측정하여 냉각시스템과 관련된 파라미터를 추출하였다. 머시닝센터가 공작물을 가공할 때와 작업 대기 중 일 때로 나누어 각각의 경우 냉각시스템 소비에너지를 절감할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 시뮬레이션과 실험을 통한 온도거동 양태를 비교하여, 제시된 알고리즘의 바탕을 이루는 이론이 타당함을 입증하였다. 기존 냉각시스템 내 순환펌프가 냉각을 위한 목적 외에 온도 측정을 위해 지속적으로 동작하여 낭비하는 에너지를 절감할 수 있도록 알고리즘이 구성되었다. 제시된 알고리즘은 주축의 온도를 측정하기 위해 냉각이 필요 없을 때에도 순환펌프를 주기적으로 작동시켜야 하는 단점이 있지만, 냉각시스템의 설계를 변경하지 않아 기존 머시닝센터를 소프트웨어적으로만 변경하여 사용할 수 있게 하는 장점이 있다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 지원의 “에너지 소비량 10% 이상 저감된 5축 머시닝센터 기반 복합 가공기 개발” 과제의 지원에 의해 수행되었음.

REFERENCES

1. Today Energy, “Advancement of Carbon Labelling in Korea,” <http://www.todayenergy.kr/news/articleView.html?idxno=99867> (Accessed 3 March 2015)
2. Han, J., “Carbon Regulations in EU,” Newspaper for Environmental Management, No. 146, 2012.
3. Cha, J. H., “Statistics of Electric Power in Korea,” KEPCO, Vol. 81, pp. 122-123, 2012.
4. KEPCO, “Electric Rates Table,” <http://cyber.kepc.co.kr/ckeprco/front/jsp/CY/E/E/CYEEHP00301.jsp> (Accessed 3 March 2015)
5. Oda, Y., Kawamura, Y., and Fujishima, M., “Energy Consumption Reduction by Machining Process Improvement,” Procedia CIRP, Vol. 4, pp. 120-124, 2012.
6. Lee, S.-W., Yeom, H.-K., Lee, H. K., and Park, K.-J., “Design of an Energy Saving Oil Cooler System using Hot Gas,” Int. J. Precis. Eng. Manuf., Vol. 11, No. 3, pp. 375-380, 2010.
7. Siemens, “Energy-Efficient Machine Tools Are Economical and Productive with Sinumerik Ctrl-Energy from Siemens,” http://www.siemens.com/press/pool/de/pressemitteilungen/2011/drive_technologies/IDT2011073038e.pdf (Accessed 3 March 2015)
8. Schischke, K., Hohwieler, E., Feitscher, R., König, J., Nissen, N. F., et al., “Energy-Using Product Group Analysis - Lot 5: Machine Tools and Related Machinery,” <http://www.ecomachinetools.eu/typo/reports.html> (Accessed 3 March 2015)
9. Abele, E., Sielaff, T., Schiffler, A., and Rothenbucher, S., “Analyzing Energy Consumption of Machine Tool Spindle Units and Identification of Potential for Improvements of Efficiency,” Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing, pp. 280-285, 2011.
10. Kim, T., Kim, T., and Jee, S., “Standby Strategies for Energy Saving in Peripheral Equipment of Machine Tools,” J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 30, No. 5, pp. 486-492, 2013.
11. Kim, T., Kim, T., and Jee, S., “Autonomous Warm-Up Management Algorithm for Energy-Saving in Machine Tools,” Proc. of KSPE Spring Conference, p. 1090, 2014.
12. Kim, T., Kim, T., and Jee, S., “Prediction of Spindle Temperature Behavior for Energy-Saving in Machining Centers,” Proc. of KSPE Autumn Conference, p. 5, 2014.