

◆ 특집 ◆ 공작기계의 소비 에너지 저감 기술

## 공작기계 주변장치의 에너지 절감 대기전략

### Standby Strategies for Energy Saving in Peripheral Equipment of Machine Tools

김태정<sup>1</sup>, 김태호<sup>1</sup>, 지성철<sup>1,✉</sup>  
Taejung Kim<sup>1</sup>, Taeho Kim<sup>1</sup>, and Sungchul Jee<sup>1,✉</sup>

<sup>1</sup> 단국대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Dankook Univ.)  
✉ Corresponding author: scjee@dku.edu, Tel: +82-31-8005-3504

Manuscript received: 2013.3.8 / Accepted: 2013.3.29

*Energy cost has been increasing rapidly to comply with environmental regulations worldwide and the manufacturing industry who consumes more than half of the total energy needs to improve their cost competitiveness considering environmental costs. Machine tools are essential elements in manufacturing industry and efforts have been made recently to increase their energy efficiency mainly by German and Japanese machine tool builders. In this paper, trends in energy saving technology are described on the hardware and software sides of peripheral equipment of machine tools. In addition, the power consumption of a machining center is measured and analyzed to develop a software-based standby strategy for energy saving with peripheral equipment of machine tools.*

Key Words: Machine Tools (공작기계), Peripheral Equipment (주변장치), Power Consumption (소비 전력), Energy Saving (에너지 절감), Standby Strategy (대기전략)

#### 1. 서론

화석연료가 고갈되어가고 전세계적으로 환경규제 정책이 시행됨에 따라 에너지 가격이 급격히 상승하고 있다. 2010년 8월 프랑스에서 세계 최초로 탄소성적 부착(carbon labeling) 의무화 법안이 공포되었고 세계 각국이 탄소성적표시제도에 자발적으로 참여하고 있다. EU는 에너지 규제 정책을 주도하고 있는데, 탄소 사용량에 따른 세금 부과, 정부 우선구매, 인센티브 제공 등을 탄소성적표시제의 정착을 위한 지원책으로 제시하고 있다.<sup>1</sup> 이러한 에너지 관련 정책이 전자제품뿐만 아니라 산업용 기계에 대한 무역장벽으로 작용할 것으로 예측되며 환경비용을 고려한 가격경쟁력 확보가 제조업체의 시급한 과제로 대두되고 있다.

Fig. 1에 2011년도 국내 전기 소비량을 산업별로 나타내었고,<sup>2</sup> Fig. 2에 국내 산업용 에너지 가격의 추이를 나타내었다.<sup>3</sup> Fig. 1에 나타낸 바와 같이 국내에서 소비된 에너지의 약 51%가 제조업에서 사용되어 국내 전력 소비의 측면에서 제조업이 차지하는 비중이 매우 큰 것으로 분석된다. Fig. 2의 통계자료에 의하면 2006년도 이후 국내 산업용 에너지 가격이 꾸준한 증가세를 보이고 있는 것으로 나타나는데, 논의되고 있는 국가 에너지 정책을 고려하면 그 증가세는 지속될 것으로 예측된다.<sup>4</sup> 에너지 비용의 상승은 원가 상승의 직접적 압박 요인으로 작용하므로 에너지 관리 능력이 개별 제조사의 경쟁력을 결정짓는 새로운 변수가 될 것이다.

머시닝센터는 자동차 및 항공 산업의 근간을 이룰 뿐 아니라 다이와 몰드에 의존하는 각종 소

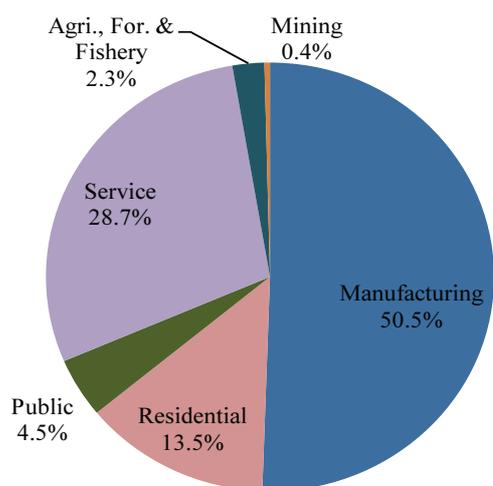


Fig. 1 Power sales in Korea (2011)

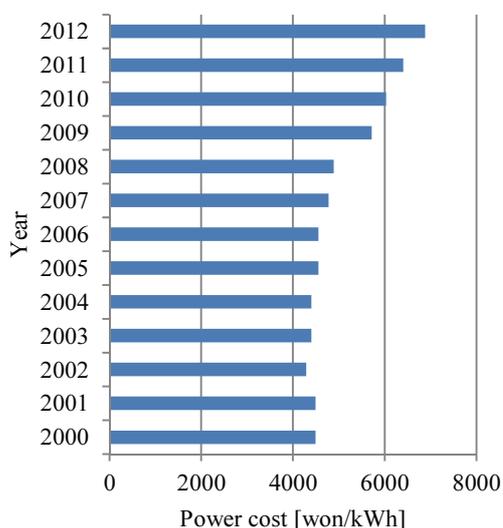


Fig. 2 Trends in industrial energy cost in Korea

비재의 생산에도 필수적인 생산요소로서 제조업에서 차지하는 중요도가 높다. 금속 절삭에는 높은 수준의 에너지가 소비되는데, 평균적으로 머시닝센터 한 대의 소비 전력이 가정용 냉장고의 200여 배에 달한다.

기계의 크기와 용량에 따라 예열 시간이 상당히 길어질 수 있고 에너지 소비도 과다할 수 있음이 알려져 있다.<sup>5</sup> 에너지 비용을 고려하지 않는다면 가공물의 가공정밀도를 일정하게 유지하면서 작업자가 원하는 시점에 작업을 시작하기 위해 공작기계를 상시 가공준비 상태로 유지하는 것이 생

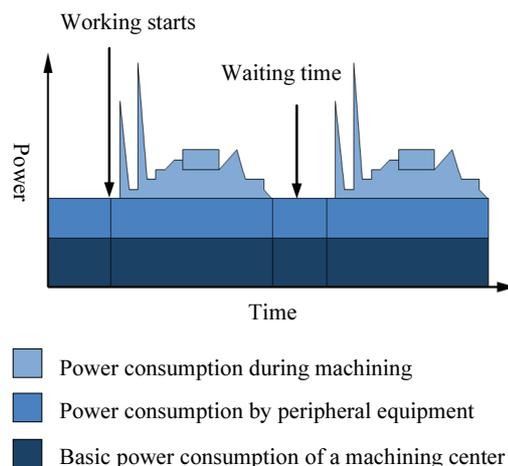


Fig. 3 Energy consumption pattern in a typical working environment

산성 측면에서 유리하다. 즉, Fig. 3과 같이 1일 가공 개시 시점 전에 기계를 예열하고 작업 단위 간 대기시간에도 기계의 전원을 계속 켜두는 것이 에너지 비용이 부담되지 않을 때의 작업장의 통상적인 운영 방식이다. 에너지 가격의 상승에 따라 개별 제조사가 에너지 비용에 민감해질 것으로 예상되므로 공작기계 제작사는 대기전력을 절감할 수 있는 보다 세밀한 운영 방식을 제공할 필요가 있다.

2000년대 이후 독일과 일본을 중심으로 공작기계의 에너지 효율을 향상시키기 위한 다양한 연구 개발 활동이 진행되어 왔다. 하드웨어적으로는 주변장치들의 에너지 효율을 향상시키는 방향으로 연구가 진행되었고, 소프트웨어적으로는 에너지 관리 시스템을 도입하는 방향으로 연구가 진행되었다. 이러한 연구 개발의 결과물로 한국기계연구원의 오일쿨러와 유압시스템의 에너지 효율 향상에 관한 연구,<sup>6</sup> Mori Seiki사의 냉각펌프 작동주기 최적화,<sup>7</sup> Siemens사의 에너지 관리 소프트웨어 개발,<sup>8</sup> DMG사의 에너지 관리 소프트웨어 및 외부 장착 키트의 개발,<sup>5</sup> 독일 Leipzig대학의 스피들 소비 에너지 분석에 관한 연구<sup>9</sup> 등이 보고되어 있다.

본 논문에서는 공작기계의 에너지 절감에 대한 국내외의 연구 개발 동향을 소개하였다. 또한, 향후 소프트웨어 기반의 주변장치 대기전략에 사용될 주변장치의 작동 방식을 결정하기 위해 에너지 관리 소프트웨어가 장착되지 않은 머시닝센터의 소비 전력을 측정 한 후 그 결과를 분석하여 소프트웨어적 에너지 절감의 가능성을 살펴보았다.

## 2. 기술 동향

공작기계 에너지 절감 기술의 동향을 하드웨어 자체의 효율 증대 측면과 그 효과가 크면서 구현이 용이한 대기전력 관리 기술을 중심으로 한 소프트웨어적 측면으로 분류하여 소개한다.

### 2.1 하드웨어 기반 소비 에너지 저감 기술 동향

공작기계는 다수의 부품으로 이루어진 시스템으로 공작기계를 구성하는 각 부품의 효율을 향상 시킴으로써 공작기계의 에너지 소비를 절감할 수 있음은 자명하다. Schischke<sup>5</sup>는 구조 최적화를 통한 경량화, 에너지 재생 드라이브 모듈의 사용, 볼스크류 드라이브를 대체하는 직접 드라이브의 채용, 동력 전달 장치에서 V 벨트를 대체하는 cogged V 벨트의 사용 등을 하드웨어적 에너지 소비 절감 방안으로 제시하였다. 냉각 및 유압시스템에 대하여는 국내의 연구개발 동향을 아래에 제시한다.

공작기계의 열변형을 최소화하고 에너지 효율을 향상시키는 gas bypass 방식의 오일쿨러와 가변 토출형 유압시스템에 대한 연구가 한국기계연구원에서 진행되었다.<sup>6</sup> Fig. 4에 gas bypass 방식의 오일쿨러의 작동원리를 나타내었다. gas bypass 방식의 오일쿨러는 압축된 가스 일부 또는 전부를 열교환기 입구에서 PID제어를 통해 적절한 비율로 혼합하여 냉각유의 온도 제어 효율을 제고함으로써 소비 에너지를 절감할 수 있다. Fig. 5에 보인 바와

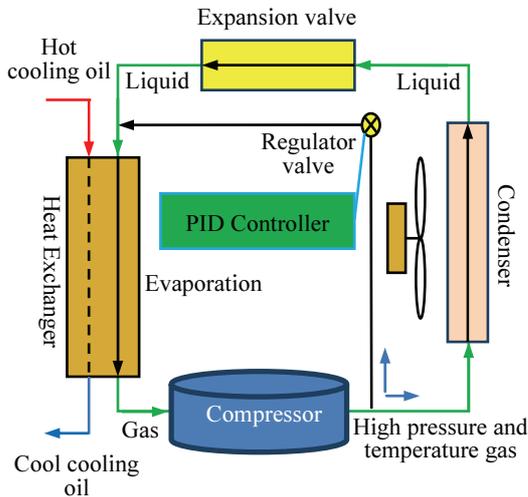
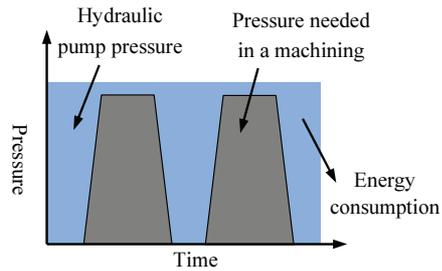
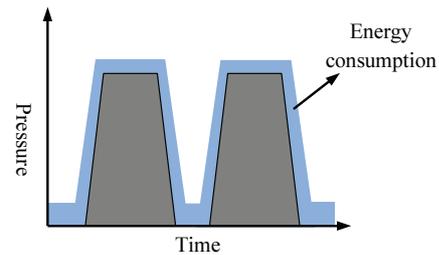


Fig. 4 Working principle of the hot gas bypass type oil cooler



(a) Energy consumption of a fixed discharge hydraulic pressure system



(b) Energy consumption of a variable discharge hydraulic pressure system

Fig. 5 Comparison between a fixed discharge hydraulic pressure system and a variable discharge hydraulic pressure system

같이 가변 토출형 유압시스템은 공작기계에서 필요로 하는 최소유압만 발생시키다가 PID 제어를 통해 추가로 필요한 유압에 적절히 대응함으로써 소비되는 에너지를 절감할 수 있다.

### 2.2 소프트웨어 기반 에너지 저감 기술 동향

Abele<sup>9</sup>은 압축공기 소비, 공구교체 시 사용전력, 유압장치의 대기손실, 베어링과 회전계의 마찰 손실, 전기 구동계의 손실 등의 관점에서 스펀들의 에너지 소비량을 분석하여 주변장치의 에너지 소비량을 개선하는 것이 머시닝센터의 에너지 소비 절감에 유효함을 밝혔다. Fig. 6에 제시된 5축 머시닝센터의 전력소비 패턴에 관한 Mori Seiki사의 분석에 의하면 전체 에너지의 약 54%가 냉각과 관련된 장치에서 소비된다. 이에 Mori Seiki사는 냉각펌프의 작동주기를 최적화하여 냉각펌프에서 소비되는 에너지를 약 42% 절감하였다고 보고한 바 있다.<sup>7</sup>

DMG사의 분석에 의하면 머시닝센터 가동 시 약 60%의 에너지가 공회전 동안에 소비되는 것으로 나타났다.<sup>5</sup> 대부분의 경우 보조장치의 전력 소

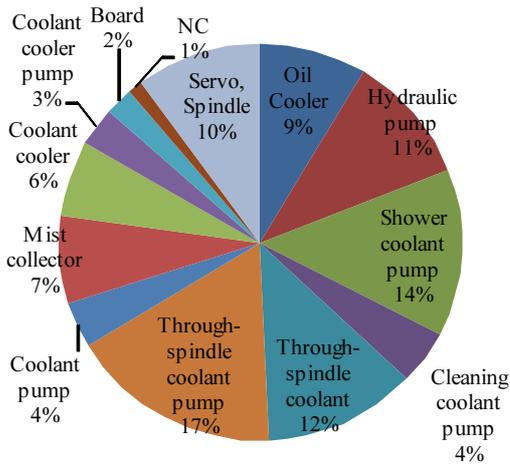


Fig. 6 Energy consumption pattern during machining a workpiece having several holes

비량이 가동시간에 비례하므로 가능한 단시간 내에 절삭 프로세스를 완료하는 것이 에너지 효율 면에서 최적의 방법인 것으로 분석되었다. CAD/CAM 시스템의 개선을 통해 효율적 공구경로를 생성함<sup>10</sup>으로써 절삭 시간을 단축하고, 비가공시간 동안 세밀한 대기전력 관리 전략<sup>5,7</sup>을 적용한다면 주변장치에서 낭비되는 에너지를 절감하여 머시닝 센터가 소비하는 에너지 중 상당부분을 절감할 수 있음을 알 수 있다.

**2.3 대기전력 저감 기술의 동향 및 목표**

비가공시간은 공장 단위의 생산량, 생산 스케줄, 작업자의 습관, 작업환경 등에 따라 에너지 손실의 요인으로 작용한다. 대량생산에서의 비가공시간이 소량생산에서의 비가공시간보다 짧게 나타나는 경향이 있으며 생산계획 및 작업 준비시간과 관련되어 있다. 비가공시간은 예측 가능한 요인과 예측 불가능한 요인에 의해 발생할 수 있다. 예를 들어, 1일 작업 종료 시점과 개시 시점 사이의 비가공시간은 예측 가능하며, 생산계획이 일정하지 않은 경우, 작업자의 숙련도를 예측하기 어려운 경우 등에서는 비가공시간과 그 시점을 예측하기가 어렵다.

작동모드를 선택할 수 있게 하여 비가공시간 동안의 에너지를 관리하는 단순한 수준의 대기전력 관리 솔루션이 에너지 문제에 선제적으로 대응한 공작기계 제조사들에 의해 제공되고 있다. Siemens사가 개발한 에너지 솔루션인 SINUMERIK

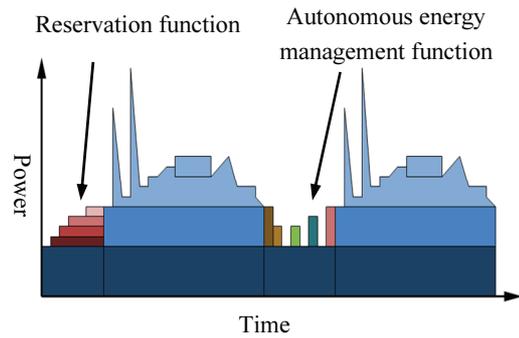


Fig. 7 Energy management functions

Ctrl-Energy는 machine standby 모드, NC standby 모드, auto shut-down 모드로 분류된 작동모드를 제공함으로써 사용자가 에너지 운영 방식을 보다 세밀히 제어할 수 있게 하고 있다.<sup>8</sup> DMG사의 AUTO shutdown 모듈은 사용자가 전원차단 시간에 대한 기본값을 설정할 수 있도록 하며, 열보상과 시간 예약이 가능한 warm-up 기능을 갖추고 있다.<sup>8</sup> 열보상과 관련된 기능은 작동모드의 기계가 공회전 동안에 열적 특성을 유지하여 위치제어 상태를 유지해야 하는 제한 요건을 반영한 것이다. 기계 제조사에 무관하게 기계 외부에 장착하여 공회전 동안의 전력소비를 관리할 수 있도록 하는 장치인 EnergySave도 DMG사에서 출시되었다.<sup>5</sup>

대기전력 저감 기술을 아래에 정의하는 전력 예약관리 기능과 전력 자율관리 기능으로 분류할 수 있음을 상술한 선행연구로부터 알 수 있다. 전력 예약관리 기능은 예측 가능한 비가공시간에 대응하기 위한 것으로 예약 시점에 가공이 개시될 수 있는 상태로 개별 보조장치가 대기하도록 하는 기능이다. 전력 자율관리 기능은 예측 불가능한 비가공시간에 대응하기 위한 것으로 작업 특징을 추정하고 기계의 상태를 모니터링하여 대기모드로 진입하게 하고 주변장치가 에너지를 과다 소비하지 않으면서 적절한 수준의 작동 준비 상태를 유지하게 하는 기능이다. 이를 Fig. 7에 도식화하여 표현하였다. 각 주변장치가 필요로 하는 예열 시간과 예열 방식을 결정하면 예약관리 기능을 상대적으로 용이하게 구현할 수 있지만 최적의 예열 조건에 대해서는 알려진 바가 많지 않다. 자율관리 기능은 사용자가 비가공시간 동안의 개별 주변장치의 작동 주기 및 기간 등 작동 파라미터를 직접 설정하는 단순한 방식으로부터 예측 비가공시간과 가공준비 수준 등 작업장의 특징을 나타내는

간접적 파라미터로부터 확률적 추정에 의해 작동 파라미터를 결정하는 보다 간접적이고 진전된 방식 등 다양한 형태로 구현이 가능하다. 예약관리와 자율관리를 포함하는 대기전력 관리 기술의 구현을 위해서는 기계의 특성뿐만 아니라 작업자를 포함한 작업장의 특성을 파악할 필요가 있다.

**3. 기존 공작기계의 에너지 소비패턴 분석**

남선기공의 머시닝센터와 저자의 연구 그룹이 보유한 C-Tek사의 머시닝센터가 무부하 운전 중 소비하는 에너지를 측정하였다. Fig. 8에 측정에 사용된 두 머시닝센터를 제시하였다. 냉각기가 기계 전체에 대비하여 소비하는 에너지를 C-Tek사의 KM-80D 모델에 대해 파악하였고, 냉각기가 소비하는 에너지와 이송축이 무부하 상태에서 이송 중 소비하는 에너지를 남선기공의 SPHINX-4X/50 모델에 대해 비교하였다.

**3.1 측정장치 및 소비 전력 측정**

Fig. 9와 같이 단자함 내 측정 대상 장치의 전원 단자에 전압센서를 연결하여 전압을 측정하였고, 각 상 전선에 Hall 센서를 설치하여 전류를 측정하였다. 최대 50 A까지 측정 가능한 전류 센서와 최대 500 V까지 측정 가능한 전압센서를 사용하였다. 각 센서에서 출력되는 신호를 DAQ보드에서 1 kHz의 샘플링 주파수(sampling frequency)로 수집하였다. 측정과정에서 일정한 수준의 노이즈가 발생하였는데, 주로 DAQ보드에서 나타났다. 이동평균(moving average) 기법<sup>11</sup>을 이용하여 측정 중 발생한 노이즈를 제거하였다. 기준 시각으로부터 200 ms까지의 데이터를 평균하여 기준 시각의 값으로 설정하였고, 50 ms 간격으로 기준 시각을 설정하였다.



(a) KM-80D (b) SPHINX-4X/50  
Fig. 8 Machining centers used in the experiments

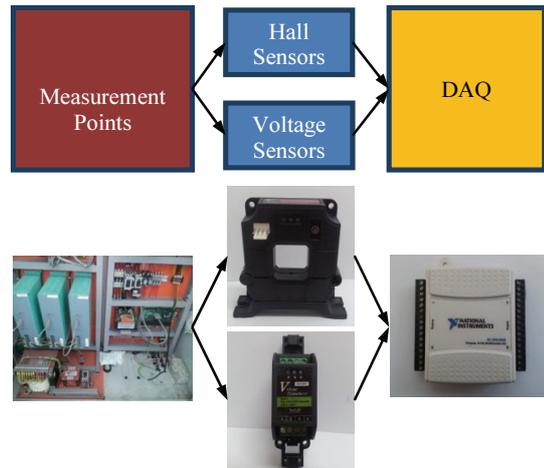


Fig. 9 Experimental setup

각 상에 흐르는 전류가 평형 상태라면 식 (1)을 사용하여 3상 전원의 소비 전력을 계산할 수 있다.<sup>12</sup>

$$P = \sqrt{3}V_{rms} I_{rms} \cos\phi \tag{1}$$

여기서  $V_{rms}$  는 두 선간의 실효전압이고,  $I_{rms}$  는 한 상에 흐르는 실효전류,  $\cos\phi$  는 전압과 전류의 위상차  $\phi$  에 의한 역율(power factor)이다. 가능하면 회로가 균형을 이루도록 기계를 설계하지만 제작상의 한계로 회로의 균형이 완벽하게 유지되기는 힘들다. 따라서 각 상의 전류  $I_{1,rms}$ ,  $I_{2,rms}$ ,  $I_{3,rms}$  를 측정하여 식 (2)와 같이 머시닝센터가 소비하는 전력을 근사적으로 계산하였다.

$$P = V_{rms} (I_{1,rms} + I_{2,rms} + I_{3,rms}) \cos\phi / \sqrt{3} \tag{2}$$

**3.2 기존 공작기계의 에너지 소비량 측정 및 분석**

C-Tek사의 3축 머시닝센터 KM-80D의 소비 전력을 측정하는 데 사용한 작동 순서는 Table 1과 같다. 주전원 스위치를 켜 후 냉각기 내의 압축기가 작동하기 전까지가 머시닝센터의 대기시간이라고 할 수 있다. Fig. 10에서 볼 수 있듯이 대기 시 머시닝센터 전체의 소비 전력은 약 540 W, 순환 펌프가 냉각유를 순환시키며 소비하는 전력이 약 218 W로 냉각계가 전체 소비 에너지의 약 40%를 사용한다. 스핀들에 부하가 발생하여 온도가 상승하면 냉각기 내 압축펌프가 작동하여 냉각이 이루어

Table 1 Steps of operations (KM-80D)

Time (min : sec)	Operations
1 : 00	main switch on
2 : 30	cooler on
3 : 50	cooler off
4 : 10	spindle on (3000 rpm)
5 : 00	spindle off
6 : 00	feed X Axis
7 : 00	feed Y Axis
8 : 00	feed Z Axis
9 : 10	all axes on idle
9 : 30	main switch off

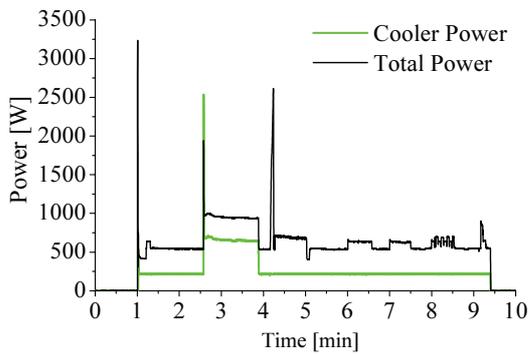


Fig. 10 Energy consumption of C-Tek KM-80D

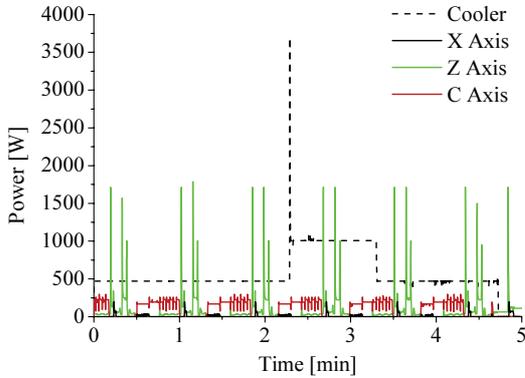


Fig. 11 Energy consumption of the cooling system compared with that of the feed drive system

어진다. 실험시간을 단축하기 위해 냉각기의 작동 온도를 낮게 설정하여 인위적으로 냉각기를 작동 시켰다. 스핀들이 냉각될 때, 기계의 전체 소비 전력은 약 950 W, 냉각계의 소비 전력은 약 650 W로 전체 소비 에너지의 약 68%가 스핀들의 냉각에 사용된다. 냉각이 이루어지지 않은 채로 스핀들이

가동되면 기계가 소비하는 전체 전력은 약 710 W, 냉각계의 소비전력은 약 218 W로 나타나 전체 소비 에너지의 약 31%를 냉각계가 사용함을 알 수 있었다. 각 이송축을 무부하 상태에서 3600 mm/min로 이송시키며 측정된 개별 이송축의 소비 전력은 약 80 W로 냉각계가 개별 이송축보다 약 2.7배 많은 에너지를 소비한다.

남선기공 4축 머시닝센터 SPHINX-4X/50에 대해서는 각 이송축을 무부하 상태에서 반복적으로 동작시키며 이송축의 동작과 냉각에 소비되는 에너지를 각기 측정하여 Fig. 11에 비교하였다. 이송축의 운동 방향이 변경될 때 가속도가 증가하면서 순간적으로 소비 전력이 크게 나타나지만 이송축이 등속 운동 상태에 들어가면 상대적으로 미미한 에너지가 소비됨을 알 수 있었다. 냉각펌프가 냉각유를 순환시키며 소비하는 전력이 500 VA 수준이며, 압축기가 작동하여 냉각이 이루어지면 1000 VA 수준의 전력이 소비되었다. 이상의 측정 결과로부터 무부하 상태에서 이송계가 소비하는 에너지는 냉각계가 소비하는 에너지에 비해 상당히 미미한 수준임을 알 수 있다. 본 연구를 통해 주변장치 중 대기 시간 동안 에너지 소비량의 상당한 비중을 차지하는 냉각기의 지능적 자율관리 시스템이 개발될 예정이다.

#### 4. 결론

에너지 비용 상승에 대응한 공작기계 에너지 절감 기술의 동향을 소개하였다. 냉각계를 중심으로 머시닝센터의 전력소비량을 측정하고 비가공시간 동안의 에너지 소비 패턴을 분석하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 실험에 사용된 두 기계의 냉각계의 에너지 소비 형태는 매우 흡사하다. 대기 상태에서 머시닝센터는 약 40%의 에너지를 순환펌프의 동작에 사용한다. 비가공시간의 주변장치의 소비 에너지를 줄이는 것만으로도 상당한 수준의 에너지 절감 효과를 볼 수 있다.

(2) 무부하 이송에 소비되는 에너지는 순환펌프의 동작에 소비되는 에너지에 비해 미미한 수준이다.

2012년 국내 산업용 에너지 가격을 기준으로, 1일 대기시간이 약 5시간이라고 가정한다면, 실험에 사용한 머시닝센터 수준으로 에너지를 소비하는 공작기계 200대가 설치된 공장에서 연간 약

3~8억원 상당의 비용이 대기전력으로 소비될 수 있다.

향후 냉각계를 포함한 주변장치의 소비 형태를 보다 체계적으로 분석하여 머시닝센터의 대기전략을 수립하는 데 활용할 예정이다. 개별 주변장치의 가공 개시 요건을 파악하고 작업장의 특성을 반영하는 직간접적 방법에 대해 연구가 진행될 예정이다. 에너지 관리 알고리즘을 구성한 후 PLC 프로그래밍을 통해 주변장치의 에너지 관리 기능을 구현할 계획이다.

## 후 기

이 논문은 지식경제부 지원의 “에너지 소비량 10% 이상 저감된 5축 머시닝센터 기반 복합가공기 개발” 과제의 지원에 의해 수행되었음.

## 참고문헌

- Han, J., “Response to Carbon Regulations in EU,” Newspaper for Environmental Management, No. 146, Available online: [http://www.elnew.co.kr/bbs/board.php?bo\\_table=new\\_01&wr\\_id=1032](http://www.elnew.co.kr/bbs/board.php?bo_table=new_01&wr_id=1032), 2012.
- Cha, J. H., “Statistics of Electric Power in Korea,” KEPCO, Vol. 81, pp. 122-123, 2012.
- KEPCO, “Electronic Rates Table,” Available online: [http://cyber.kepco.co.kr/cyber/01\\_personal/01\\_payment/payment\\_table/payment\\_table\\_past.jsp](http://cyber.kepco.co.kr/cyber/01_personal/01_payment/payment_table/payment_table_past.jsp).
- KEPCO, “Related Reference Concerning Adjustment Enforcement of Electronic Rates,” No. 62, Available online: [http://cyber.kepco.co.kr/kepconew/pr/news/press\\_view/jsq](http://cyber.kepco.co.kr/kepconew/pr/news/press_view/jsq), 2013.
- Schischke, K., Hohwieler, E., Feitscher, R., König, J., Nissen, N. F., Wilpert, P., and Kreuzschner, S., “Energy-Using Product Group Analysis-lots 5: Machine Tools and Related Machinery,” Available online: <http://www.ecomachinetools.eu/typo/reports.html>, 2012.
- Lee, S. W., Yeom, H. K. and Lee, H. K., “Development Status of Peripheral Equipment in Energy Saving Machine Tools,” Journal of Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 17, No. 2, pp. 11-17, 2008.
- Oda, Y., Kawamura, Y., and Fujishima, M., “Energy Consumption Reduction by Machining Process Improvement,” Procedia CIRP, Vol. 4, pp. 120-124, 2012.
- Siemens, “Energy-Efficient Machine Tools are Economical and Productive with Sinumerik Ctrl-Energy from Siemens,” Nuremberg/Erlangen, Germany, Reference Number: IDT2011073038e, 2011.
- 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.
- Rangarajan, A. and Dornfeld, D., “Efficient Tool Paths and Part Orientation for Face Milling,” CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol. 53, No. 1, pp. 73-76, 2004.
- Figliola, R. S. and Beasley, D. E., “Theory and Design for Mechanical Measurements,” Wiley, pp. 37-71, 2006.
- Rizzoni, G., “Principles and Applications of Electrical Engineering,” McGraw-Hill, pp. 219-226, 2003.