



국제표준 기반 공작기계 소비에너지 정량측정 및 저감 기술 개발

이재학^{a,*}

Development of Energy Consumption Measurement and Reduction Technology for Machine Tools in Accordance with International Standards

Jaehak Lee^{a,*}^a Autonomous Manufacturing & Process R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH)

ARTICLE INFO

Article history:

Received 5 November 2025

Accepted 12 November 2025

Keywords:

Machine tool

Energy consumption

ISO14955

Monitoring

On/off control

ABSTRACT

This study proposes an energy consumption monitoring system for machine tools that complies with ISO 14955 and implements energy-reduction technologies. The proposed system synchronizes electrical power, pneumatic, and ambient temperature/humidity sensor data with CNC controller data in real time to identify operating states and generate standardized energy consumption assessment reports. Using PMC DIO control technology, adaptive on/off control algorithms were implemented for major auxiliary equipment, including coolers, mist collectors, and chip conveyors, based on spindle temperature, enclosure humidity, and machining status. The auxiliary equipment accounted for over 60% of the total energy consumption. The control system reduced standby power and processing power consumption by 31.4% and 9.4%, respectively, achieving an overall annual energy reduction of 13% without hardware modifications and demonstrating immediate applicability to industrial environments.

1. 서론

기계를 만드는 기계(mother machine)라고 불리는 공작기계는 모든 산업 기계의 핵심부품을 생산하는 근간 설비로서, 전 세계 에너지 소비의 1.3%에서 3.8%를 차지하는 주요 에너지 소비원이다^[1-3]. 이와 같은 높은 공작기계의 에너지 소비는 단순히 전력 사용량의 문제를 넘어 제조업 전반의 탄소배출과 직결되는 중요한 환경 이슈로 부상하고 있다. 특히 최근 전 세계적으로 추진되는 탄소중립 정책과 ESG 경영 패러다임의 확산은 제조업체들에게 체계적이고 정량화된 에너지 관리 시스템 구축을 요구하고 있다^[4-6].

공작기계의 효율적인 소비에너지 저감을 위해서는 공작기계의

소비에너지 패턴 분석이 필수적으로 선행되어야 한다. 밀링, 터닝, 드릴링 등 다양한 공작기계 유형과 광범위한 가공 품목의 특성상, 공정과 장비 구성에 따라 에너지 소비 패턴이 현저히 상이하므로, 범용적이면서도 정량적인 측정이 가능한 모니터링 시스템이 필요 하다.

최근 제정된 국제표준 ISO 14955에서는 공작기계 에너지 평가를 위한 표준화된 방법론을 제시하고 있다^[7-9]. 장비의 동작 상태(operating state)를 Off, Standby, Processing 등으로 세분화하고, 각 상태의 평균 소비에너지를 계산하고 비율에 맞게 합산하여 연간 소비에너지량을 산출하도록 한다. DMG MORI (독일/일본), MAZAK (일본), OKUMA (일본)과 같은 해외 공작기계 선진사

* Corresponding author. Tel.: +82-31-8040-6163

E-mail address: ljh1125@kitech.re.kr (Jaehak Lee).

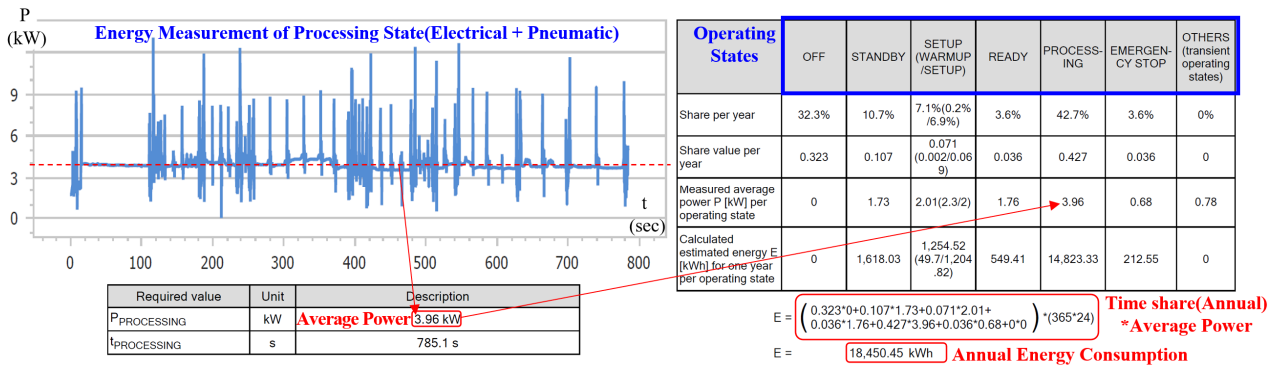


Fig. 1 Overview of ISO 14955-based energy measurement methodology for machine tools

들은 ISO 14955에 기반한 소비에너지 정량측정결과를 발표하고 있다^[10-12].

본 연구에서는 ISO 14955 표준에 부합하는 소비 에너지 정량측정을 가능하게 하는 시스템을 개발하였다. 개발된 시스템은 공장 기계의 동작 상태를 자동으로 인식하고, 전기 에너지와 압축공기 등 비전기 에너지를 포함한 소비에너지를 정량적으로 측정한다. 또한 쿨러, 미스트컬렉터, 칩컨베이어 등의 주요 부대장치들을 사전 정의한 알고리즘에 따라 실시간으로 On/Off 제어하는 적응형 에너지 저감 기술을 구현하였다. 본 시스템을 통해 국제표준 기반 소비에너지 평가체계를 구축하고, 실제 산업 현장에서 즉시 적용 가능한 에너지 저감 기술을 개발하고자 한다.

2. 국제표준 분석 및 모니터링 시스템 개발

2.1 ISO 14955 분석

ISO 14955는 공장기계 소비에너지에 대한 체계적인 측정 방법을 주로 기술하며, 소비에너지를 줄일 수 있는 환경친화적인 공장 기계 설계 지침에 대해서도 다루고 있다. ISO 14955 이전에도 공장기계 소비에너지 측정체계를 확립하기 위한 시도들이 있었지만^[13,14], ISO 14955는 두 가지 측면에서 차별화된다. 첫번째, 공압 및 열에너지를 포함한 전기 에너지 이외의 에너지원 측정을 요구한다. 두번째, 대기 및 셋업과 같은 비가공 상태에서의 에너지 소비 측정을 의무화하고, 평가자가 각 동작 상태에 대한 연간 시간 점유율을 계산하여 총 연간 에너지 소비를 결정하도록 요구한다.

Fig. 1은 국내 가공기업의 ISO 14955에 기반한 공장기계 에너지 측정 사례를 보여준다. 좌측 그래프는 Processing 상태에서 측정된 전기 및 공압 에너지를 합산한 실시간 전력 데이터를 나타낸다. ISO 14955에서는 각 상태에서의 평균 전력의 산출을 요구하며, 계산된 Processing 상태의 평균 전력 3.96 kW가 우측 표에서 해당 단계의 평균 전력으로 활용되는 것을 확인할 수 있다.

최종적으로 연간 에너지 소비량은 각 상태의 평균 전력과 연간

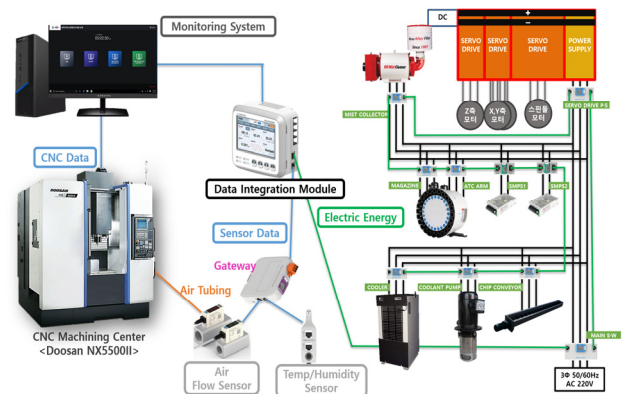


Fig. 2 System architecture for machine tool energy consumption monitoring

시간 점유율을 곱한 값들의 합으로 계산된다. 각 동작 상태별 연간 시간 점유율을 ISO 14955에서는 Time share라고 정의하고 있으며, 각 단계별 소비에너지량을 더한 결과 총 18,450 kWh의 에너지가 연간 소비된다는 것을 확인할 수 있다. ISO 14955에서는 소비에너지를 측정하는 기관에서 Time share를 산출하여 최종 소비 에너지 산출에 활용하도록 규정하고 있으며, 산출이 어려운 경우에는 활용할 수 있는 표준 Time share 또한 제공하고 있다.

2.2 소비에너지 모니터링 시스템 개발

Fig. 2는 본 연구에서 개발한 에너지 소비 모니터링 시스템의 개략도를 나타낸다. 에너지 소비 모니터링 시스템은 3축 머시닝센터(DN Solutions, NX5500 II)에 설치되었으며, 메인 스위치와 9개의 주요 전력 소비 구성요소에 전력 센서(Rootech, Accura2550CM)를 부착하였다. 구성요소의 전력 소모 특성에 따라 5A부터 250A까지의 측정 범위와 단상 또는 3상 측정이 가능한 적절한 전력 센서를 선정하여 사용하였다. 추가로 공압 센서(TPC Mechatronics, FP02)를 사용하여 기계에 공급되는 압축공기의 유량과 압력을 측정하고, 온습도센서(Rootech, Accura2550 temp)를 사용하여 주변 온도와 습도를 측정하였다.

앞선 절에서 설명하였듯이, ISO 14955 기반 공작기계 에너지 소비의 정확한 평가를 위해서는 전체 측정 기간 동안의 작동 상태를 체계적으로 구분하고 각 상태의 시간 점유율을 정밀하게 산출하는 것이 필수적이다. 이를 위해 본 연구에서는 공작기계 CNC 제어기 데이터를 수집하고, 센서데이터와 실시간 동기화하여 작동 상태를 실시간 판단할 수 있도록 하였다. 데이터의 저장 뿐만 아니라 사용자가 공구나 소재를 교체하는 셋업 단계는 CNC 데이터만으로는 식별하기 어려웠지만, 다른 모든 작동 상태는 시스템에서 자동으로 인식되도록 개발되었다. 워밍업 또는 가공 NC 코드의 시작과 끝에 특정 M 코드를 삽입하여 시스템의 자동 상태 인식을 용이하게 하였고, E-stop 단계는 장비 알람 데이터를 모니터링하여 자동으로 인식한다.

Fig. 3은 개발된 모니터링 프로그램의 이원화된 인터페이스 구조를 보여준다. Fig. 3(a)의 모듈은 ISO 14955 기반 표준 측정을 위한 것이며, Fig. 3(b)의 모듈은 사용자 맞춤형 상세 에너지 분석을 지원하는 범용 측정 기능을 제공한다. ISO 14955 기반 표준 측정에서는 장비의 실시간 작동상태를 판단하여 보여주며, 단계별 측정을 통해 향후 측정 리포트 생성에 필요한 데이터들을 저장한다. 사용자가 원할 경우 수동으로 작동상태를 설정하고 해당 상태에 대한 측정을 진행할 수 있는 가이드도 제공한다. 범용 측정 모듈은 개별 가공 공정의 에너지 소비 특성을 정밀 분석할 수 있도록 구성되었으며, 실시간 전력 소비량, 누적 에너지 소비량, 그리고 각 구성요소별 에너지 분배 비율을 동시에 시각화한다. 특히 전기적 에너지원뿐만 아니라 압축공기의 에너지 환산값까지 통합하여 표시함으로써 ISO 14955에서 요구하는 포괄적 에너지 평가가 가능하도록 구현하였다.

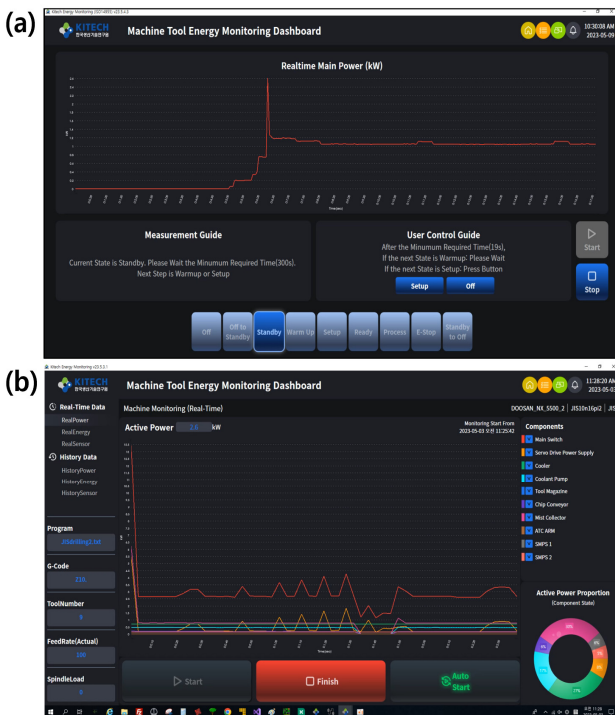


Fig. 3 Machine tool energy consumption monitoring program interface

2.3 소비에너지 측정 및 결과 분석

Fig. 4는 개발된 모니터링 시스템의 측정 정확도 검증 및 구성요소별 에너지 소비 특성 분석 결과를 나타낸다. Fig. 4(a)는 실험에 사용된 시편을, Fig. 4(b)는 소비에너지 측정 결과를 제시한다. 측정 정확도 평가를 위해 공작기계 성능 평가 표준인 JIS TS-B 0024에서 규정하는 표준 밀링 가공 공정을 적용하였으며, 시편 재질로는 Al6061을 선정하였다. Fig. 4(b)에 나타난 바와 같이, 개발 시스템의 측정 데이터를 상용 정밀 전력분석기인 FLUKE 1735 및 YOKOGAWA WT-1803의 측정값과 비교 검증한 결과, 전체 소비전력 대비 99.4%의 높은 일치도를 확인하였다.

Fig. 4(c)의 우측 원형 차트는 측정 결과의 ISO 14955 기반 연간 에너지 소비량으로의 환산결과를 나타낸다. 압축공기가 35.69%로 가장 높은 비중을 차지하였으며, 이는 ISO 14955에서 강조하는 비전기 에너지원 측정의 중요성을 실증적으로 보여준다. 다음으로 스피indle 쿨러가 20.15%, 미스트컬렉터가 13.25%, 쿨런트 펌프가 7.13%를 차지하는 반면, 실제 가공에 직접 기여하는 서보 드라이브는 10.24%에 불과하였다. 이러한 측정 결과는 공작기계 에너지

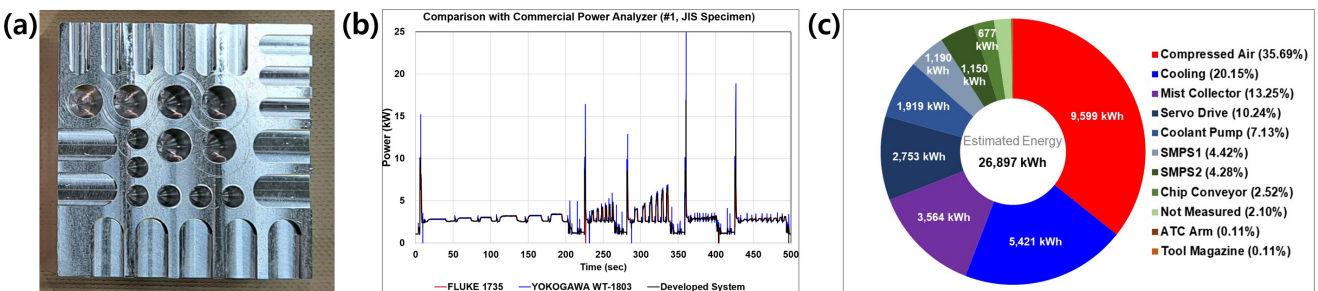


Fig. 4 Measurement accuracy validation against commercial power analyzers and component-wise energy consumption distribution for JIS TS-B 0024 specimen machining

효율 개선을 위해서는 압축공기 시스템과 냉각/집진 관련 부대장치의 최적 제어가 우선적으로 고려되어야 함을 시사한다.

3. 소비에너지 저감 기술 개발

3.1 부대장치 실시간 제어기술 개발

본 연구에서는 스핀들 쿨러, 미스트컬렉터, 칩컨베이어 등 주요 부대장치의 불필요한 에너지 소모를 최소화하기 위하여, 장비 및 공정 상태에 따라 필요 시에만 장치를 구동하도록 하는 부대장치 실시간 제어 기술을 개발하였다. 개발된 제어 기술은 실시간 모니터링 되는 CNC 제어기 및 센서 데이터를 기반으로 장비의 동작 상태를 판별하고, 이에 따라 각 부대장치의 가동 및 정지(On/Off) 제어를 자동으로 수행한다. 이를 위해 공작기계의 Programmable Machine Controller(PMC) 내에 각 부대장치별 Input/Output (I/O) 채널을 할당하고, 사전에 정의된 동작 조건 및 제어 로직에 따라 PMC 레벨에서 직접 자동 제어가 이루어지도록 구성하였다.

Table 1은 각 부대장치에 적용된 I/O 채널 구성과 각 신호의 기능을 나타낸 것이다. D900번은 전체 제어 기능의 활성화를 담당하며, 이는 의도하지 않은 제어 명령 실행을 방지하는 안전 인터록 (safety interlock) 기능을 수행한다. D901~D903번은 각각 쿨러, 미스트컬렉터, 칩컨베이어의 On/Off 제어를 수행한다. 또한 D904~D907번은 전체 부대장치 제어시스템 및 각 장치의 동작 상태를 실시간으로 모니터링하기 위해 할당된 입력 신호로, 제어 신호의 정확한 실행 여부를 확인할 수 있다.

Table 2는 개발된 부대장치 자동 제어 알고리즘의 작동 조건을 제시한다. 스핀들 쿨러의 경우, 스핀들 온도와 주변 온도의 차이를 기준으로 제어되며, 2°C의 임계값을 적용하였다. 스핀들 온도가 주변 온도 대비 2°C 이상 상승 시 자동 가동되고, 2°C 이하로 하강 시 정지되도록 설계하여 스핀들의 열적 안정성을 유지하면서도 에너지 소비를 최적화하였다. 미스트컬렉터는 가공 공간 내부에 설치된 습도 센서의 실시간 측정값을 기반으로 제어된다. 습도 60%를 임계값으로 설정하여, 절삭유 미스트로 인한 습도 상승을 효과적으로 감지하고 대응한다. 칩컨베이어의 제어는 CNC 제어기 데이터를 활용한 지능형 알고리즘을 적용하였다. 스핀들 회전속도, Z축 좌표, 절삭 부하의 분석을 통해 실제 가공 여부를 판별하며, 가공이 10초 이상 연속 수행될 때 동작을 시작하며, 가공이 종료된 후 10초 이상 경과하면 자동으로 정지한다. 이와 같은 알고리즘은 장비의 동작 상태와 환경 조건을 실시간으로 반영하여 부대장치를 자동 제어함으로써, 작업자의 관리 및 개입 없이도 불필요한 에너지 소비를 최소화하는 역할을 한다.

Fig. 5는 개발된 에너지 소비 저감 프로그램의 사용자 인터페이스

Table 1 I/O channel configuration for auxiliary equipment control in the machine tool PMC

I/O	Components	Function	Read/Write
D900	All	1: On, 0: Off	Write
D901	Spindle cooler	1: On, 0: Off	Write
D902	Mist collector	1: On, 0: Off	Write
D903	Chip conveyor	1: On, 0: Off	Write
D904	All	-	Read
D905	Spindle cooler	-	Read
D906	Mist collector	-	Read
D907	Chip conveyor	-	Read

Table 2 I/O channel configuration for auxiliary equipment control in the machine tool PMC

Components	Activation condition
Spindle cooler	Spindle temperature > Ambient + 2°C
Mist collector	Machine enclosure humidity > 60%
Chip conveyor	Machining duration > 10 seconds

를 보여준다. 본 프로그램에서는 각 부대장치 작동 임계값을 사용자가 직접 설정할 수 있으며, 활용하는 장비 및 공정 특성에 따라 임계값을 조정하여 최적의 에너지 저감 효과를 달성할 수 있다. 우측의 Energy Reduction 패널은 전체 제어 시스템의 활성화 상태와 각 부대장치의 실시간 작동 상태를 시각적으로 나타낸다. Main 항목의 녹색 상태 표시는 전체 제어 시스템이 활성화되어 있음을 의미하며, 각 부대장치의 상태 표시등은 사전 정의된 알고리즘에 따른 자동 On/Off 제어 상태를 실시간으로 반영한다. Manual 버튼을 통해 필요 시 자동 제어 모드에서 수동 제어 모드로 전환하여 작업자가 직접 부대장치를 조작할 수 있도록 구성하였다.

Fig. 5의 실시간 전력 그래프는 부대장치 제어 시스템의 에너지 저감 효과를 명확하게 보여준다. 대기(standby) 상태에서의 소비 에너지 측정 중 부대장치 제어 시스템을 활성화한 직후, 스핀들과 주변 온도의 차이가 2°C 미만으로 판단되어 쿨러가 자동으로 정지되었고, 이에 따라 전체 소비전력이 약 2.15 kW에서 1.35 kW로 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 약 0.8 kW의 즉각적인 전력 절감을 의미한다. 미스트컬렉터와 칩컨베이어의 경우, 대기 상태에서는 원래 가동되지 않는 장치이므로 별도의 상태 변화는 나타나지 않았으나, Processing 상태로 전환 시 Table 2에 정의된 조건에 따라 자동으로 제어된다.

3.2 소비에너지 저감 성능 평가

개발된 부대장치 제어 시스템의 에너지 저감 성능을 정량적으로 평가하기 위하여, 제어 기능의 활성 및 비활성에 따른 Standby 및

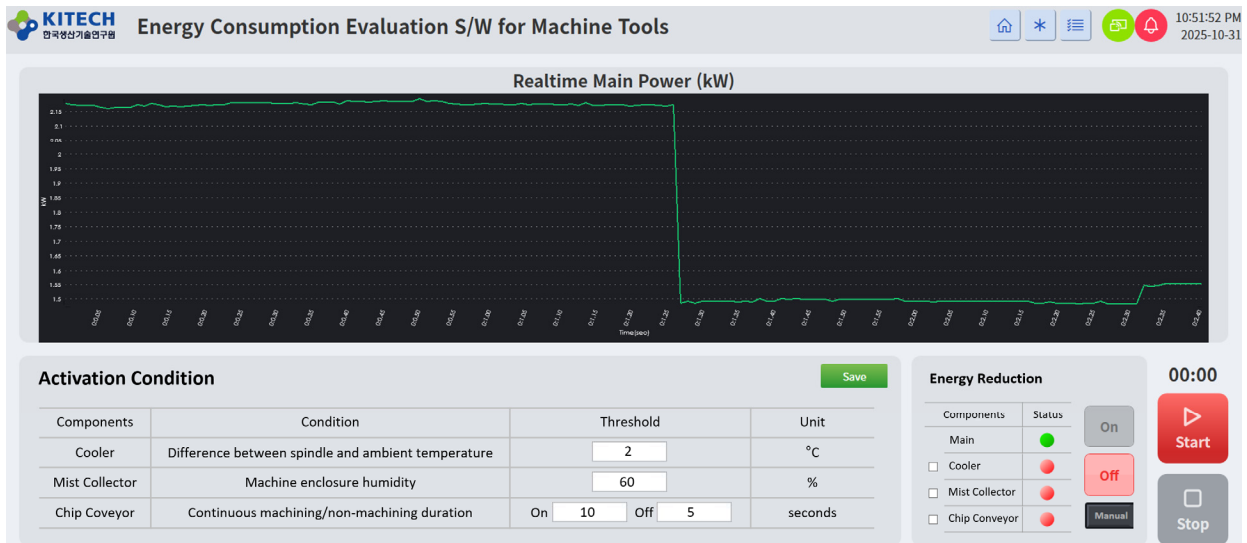


Fig. 5 User interface of real-time auxiliary component control system and power consumption during standby operation

Processing 상태의 소비에너지를 비교 측정하였다. Fig. 6(a)는 Standby 상태에서 약 350초 동안 측정된 전력 데이터를 보여준다. ISO 14955에서는 각 동작 상태 별 최소 측정시간을 요구하는 경우가 있는데, Standby 상태의 경우 300초 이상의 측정을 요구하고 있어 이에 부합하도록 측정을 수행하였다. 부대장치 제어 기능을 비활성화한 경우 평균 2.25 kW의 전력이 소비된 반면, 제어 기능을 활성화한 경우 평균 1.54 kW로 측정되어 약 0.71 kW의 전력 절감 효과를 확인하였다. 이는 대기 상태 소비전력 대비 31.4%의 저감률에 해당한다. 이러한 전력 감소는 스펀들 온도 기반 쿨러 제어에 기인한 것으로, 대기 상태에서 스펀들과 주변 온도의 차이가 임계값 이하로 유지될 때 쿨러가 자동으로 정지되어 불필요한 에너지 소비가 제거되었기 때문이다. 대기 상태에서는 미스트컬렉터 및 칩컨베이어가 원래에도 가동되지 않기 때문에, 쿨러 제어를 통한 전력 감소만이 가능하다.

Fig. 6(b)는 Processing 상태에서 약 500초 동안 수행된 JIS TS-B 0024 표준 가공 공정의 전력 측정 결과를 나타낸다. 부대장치 제어 기능 비활성화 시에는 칩컨베이어와 미스트컬렉터가 가공 시작부터 종료까지 연속 가동되는 반면, 제어 기능 활성화 시에는 Table 2에 정의된 알고리즘에 따라 부대장치가 선택적으로 작동하여, 그림에서 보이는 바와 같이 가공 공정 전반에 걸쳐 소비전력이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 부대장치별 에너지 저감 효과를 분석한 결과, 미스트컬렉터는 42%, 칩컨베이어는 35%의 에너지 저감률을 각각 나타냈다. Processing 상태 전체의 소비에너지 저감률은 9.4%로 나타나, Standby 상태 대비 상대적으로 낮은 저감률을 보였다. 이는 가공 품질에 직접적인 영향을 미치지 않는 미스트컬렉터 및 칩컨베이어만을 제어 대상으로 설정하였기 때문이다.

Table 3은 개발된 부대장치 제어 시스템의 최종 에너지 저감

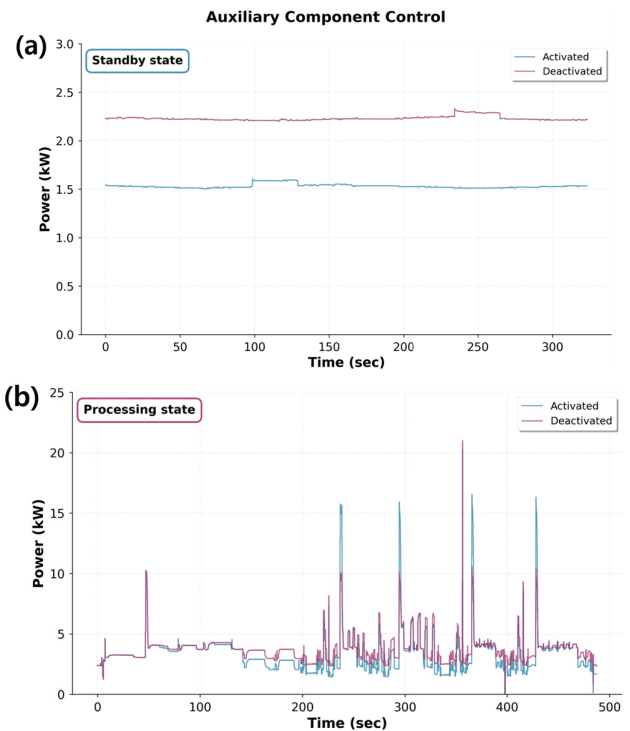


Fig. 6 Power consumption comparison with auxiliary component control in (a) standby and (b) processing states

성능을 종합적으로 평가한 결과를 나타낸다. ISO 14955에서 정의한 각 동작 상태별 평균 전력과 연간 시간 점유율(time share)을 적용하여 연간 총 소비에너지 저감률을 산출하였다. Time share는 공작기계 선진사인 DMG MORI의 GREENMODE 평가 기준과 동일하게 Standby 30%, Ready 20%, Processing 50%로 설정하였다^[10]. 부대장치 제어 기능 활성화 시 Standby와 Processing 상태에서의 소비에너지가 감소하였다. Ready 상태에서 제어 기능

Table 3 Annual energy reduction with auxiliary component control

	Standby	Ready	Processing
Time share	30 %	20 %	50 %
Average power (without control)	2.25 kW	2.25 kW	3.69 kW
Average power (with control)	1.54 kW	2.25 kW	3.34 kW
Overall reduction ratio	13 %		

활성화 여부에 따른 전력 차이가 없는 것은 Ready 상태가 공정 수행 직전의 대기 상태로서, 즉시 가공을 시작할 수 있도록 열적 안정성을 유지해야 하므로 스핀들 쿨러 제어를 적용하지 않았기 때문이다.

각 동작 상태별 평균 전력과 Time share를 곱하여 합산한 결과, 연간 총 에너지 저감률은 13%로 산출되었다. 이는 기존 동작기계의 하드웨어 개선이나 추가 설비 투자 없이, 소프트웨어 기반의 적응형 제어 알고리즘만으로 달성한 결과라는 점에서 높은 실용성을 갖는다. 본 연구에서 개발된 부대장치 제어 시스템은 가공 정밀도나 표면 품질과 같은 공정 결과에 영향을 미치지 않는 보조 장치만을 제어 대상으로 선정함으로써, 생산성 저하나 품질 문제 없이 에너지 절감 효과를 얻을 수 있다는 것 또한 입증하였다.

4. 결론

본 연구에서는 ISO 14955 국제표준에 부합하는 동작기계 소비 에너지 모니터링 시스템을 개발하고, 이를 기반으로 부대장치 적응형 제어 기술을 구현하여 에너지 저감 성능을 검증하였다. 전력, 압축공기, 온습도 센서 데이터를 CNC 제어기 데이터와 실시간 동기화하여 ISO 14955에서 정의한 동작 상태를 자동으로 인식하는 모니터링 시스템을 개발하였다. 상용 전력분석기 대비 99.4%의 측정 정확도를 확인하였으며, ISO 14955 기반 측정 및 리포팅 기능을 구현하였다. JIS TS-B 0024 표준 가공 공정을 통한 구성요소별 에너지 소비 분석 결과, 압축공기가 35.69%, 스핀들 쿨러가 20.15%, 미스트컬렉터가 13.25%를 차지하여, 부대장치 및 압축공기가 전체 에너지 소비의 60% 이상을 차지함을 정량적으로 확인하였다.

PMC DIO 제어 기술을 활용하여 스핀들 온도, 가공 공간 습도, 실제 절삭 여부를 기반으로 쿨러, 미스트컬렉터, 칩컨베이어를 실시간 자동 제어하는 적응형 알고리즘을 개발하였다. Standby 상태에서 31.4%, Processing 상태에서 9.4%의 에너지 저감 효과를 달성하였으며, ISO 14955 기반 Time share를 적용하여 산출한 연간 총 에너지 저감률은 13%로 확인되었다. 이는 하드웨어 개선

없이 소프트웨어 기반 제어 알고리즘만으로 달성한 결과로서, 기존 산업 현장의 동작기계에 즉시 적용 가능한 실용적인 기술로 평가된다.

본 연구에서 개발된 시스템은 국제표준에 부합하는 체계적인 에너지 측정 체계를 제공하고, 가공 품질에 영향을 주지 않는 범위에서 실질적인 에너지 절감을 달성함으로써, 제조업체의 탄소중립 목표 달성 및 ESG 경영 강화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 향후 연구에서는 쿨런트 펌프, 유압 장치 등 추가 부대장치로 제어 대상을 확대하고, 다양한 동작기계 유형 및 가공 공정에 대한 적용성 검증을 통해 범용성을 높일 계획이다.

후 기

이 연구는 한국생산기술연구원 융복합생산핵심기술연구사업(EO250005)의 지원을 받아 수행되었음.

References

- [1] Denkena, B., Abele, E., Brecher, C., Dittrich, M.-A., Kara, S., Mori, M., 2020, Energy Efficient Machine Tools, CIRP Annals, 69:2 646-667, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.05.008>.
- [2] Zhou, L., Li, J., Li, F., Meng, Q., Li, J., Xu, X., 2016, Energy Consumption Model and Energy Efficiency of Machine Tools: A Comprehensive Literature Review, J. Clean. Prod., 112:Part 5 3721-3734, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.093>.
- [3] Duflou, J. R., Sutherland, J. W., Dornfeld, D., Herrmann, C., Jeswiet, J., Kara, S., Hauschild, M., Kellens, K., 2012, Towards Energy and Resource Efficient Manufacturing: A Processes and Systems Approach, CIRP Annals, 61:2 587-609, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.002>.
- [4] Ye, J., Xu, W., 2023, Carbon Reduction Effect of ESG: Empirical Evidence from Listed Manufacturing Companies in China, Ecol. Evol., 11 1311777, <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1311777>.
- [5] International Energy Agency, 2023, viewed 18 November 2025 Energy Efficiency 2023, <<https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2023>>.
- [6] Fitzgerald, P., Therkelsen, P., Sheaffer, P., Rao, P., 2023, Deeper and Persistent Energy Savings and Carbon Dioxide Reductions Achieved Through ISO 50001 in the Manufacturing Sector, Sustain. Energy Technol. Assess., 57 103280, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103280>.
- [7] ISO, 2017, Machine Tools - Environmental Evaluation of

- Machine Tools - Part 1: Design Methodology for Energy-Efficient Machine Tools, ISO 14955-1, International Organization for Standardization, Geneva.
- [8] ISO, 2018, Machine Tools - Environmental Evaluation of Machine Tools - Part 2: Methods for Measuring Energy Supplied to Machine Tools and Machine Tool Components, ISO 14955-2, International Organization for Standardization, Geneva.
- [9] ISO, 2020, Machine Tools - Environmental Evaluation of Machine Tools - Part 3: Principles for Testing Metal-Cutting Machine Tools with Respect to Energy Efficiency, ISO 14955-3, International Organization for Standardization, Geneva.
- [10] DMG MORI, 2025, GREENMODE - Energy-Efficient Machine Tools, Nagoya.
- [11] Mazak Corporation, 2025, viewed 18 November 2025, Energy-saving Technology - Environmental Activities, <<https://www.mazak.com/us-en/about-us/environment/energy-saving/>>.
- [12] OKUMA Corporation, 2023, viewed 18 November 2025, Green-Smart Machine - ECO Suite Plus Technology, <https://www.okuma.co.jp/english/product/green-smart_machine/>.
- [13] JSA, 2010, Machine Tools - Test Methods for Electric Power Consumption - Part 1: Machining Centres, JIS TS B 0024-1:2010, Japanese Standards Association, Tokyo.
- [14] JSA, 2010, Machine Tools - Test Methods for Electric Power Consumption - Part 2 : Turning machines, JIS TS B 0024-2:2010, Japanese Standards Association, Tokyo.



Jaehak Lee

Principle Researcher in Korea Institute of Industrial Technology (KITECH). His research interests include Machine Tool and Automation.

E-mail: ljh1125@kitech.re.kr