



# 기본파 전류 기반 5축 머시닝센터 전력품질 추정 모델 연구

강경래<sup>a</sup>, 정대율<sup>b,\*</sup>, 김수진<sup>a,c,\*</sup>

## A Fundamental Current-Based Power Quality Estimation Model for Five-Axis Machining Centers

Kyeong-Rae Kang<sup>a</sup>, Dae-Yul Jeong<sup>b,\*</sup>, Su-Jin Kim<sup>a,c,\*</sup><sup>a</sup> Department of Aerospace & Technology Management, Gyeongsang National University<sup>b</sup> Department of Management Information Systems, Gyeongsang National University<sup>c</sup> School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received	19	December	2025
Revised	19	January	2026
Accepted	26	January	2026

#### Keywords:

Machining center  
Power factor  
Total harmonic distortion of the current  
Fundamental current  
Power quality  
Regression analysis

### ABSTRACT

The power quality characteristics of five-axis machining centers used in aerospace component manufacturing were investigated based on measurements of the fundamental current. Power quality data were collected every five minutes for 24 hours using power quality measurement equipment on APEC SK2540 and SK2580 machines. The results of a regression analysis revealed a robust relation between the fundamental current and the power factor, with the power factor approaching unity with increasing current. A significant correlation was observed between the reciprocal of the fundamental current and the total harmonic distortion of the current, which indicated substantial harmonic distortion under low load. These findings demonstrate that nonlinear load behavior in machining centers can be effectively characterized using only inexpensive measurements of the fundamental current. Therefore, the results show that this approach could provide a practical foundation for cost effective power quality monitoring, predictive maintenance, and energy efficiency management in aerospace manufacturing environments.

## 1. 서론

### 1.1 연구 배경

산업 현장에서 사용되는 전기 부하는 크게 선형 부하와 비선형 부하로 구분된다. 선형 부하는 전기히터, 백열등 등 전압과 전류가 정현파 형태를 유지하는 장비이며, 비선형 부하는 인버터, 정류기,

서보 드라이브, 스위칭 전원장치 등에서 흔히 나타난다. 이러한 비선형 부하는 기본파 외에 다수의 고조파 전류(harmonic current)를 발생시키며<sup>[1]</sup>, 이는 전력품질(power quality) 저하와 전기설비 열화, 에너지 손실의 주요 원인이 된다<sup>[3,7]</sup>.

항공기 구조물 가공에 사용되는 5축 머시닝센터는 스핀들 인버터, 서보 드라이브, 정류기, 냉각 펌프, 윤활 시스템 등 다양한 전력

\* These authors contributed equally to this work.

\* Corresponding author. Tel.: +82-55-772-1636

E-mail address: sujinkim@gnu.ac.kr (Su-Jin Kim).

\* Corresponding author. Tel.: +82-55-772-1533

E-mail address: dyjeong@gnu.ac.kr (Dae-Yul Jeong).

변환장치(variable frequency drive)로 구성된 대표적인 복합 비선형 부하이다.

특히 부분부하(partial load) 또는 무부하(idling) 그리고 대기상태(standby)에서는 기본과 전류( $I_1$ )가 작아지기 때문에 회로의 리액턴스 영향이 상대적으로 커져 역률(power factor, PF) 저하가 발생하고, 동시에 비선형 스위칭 리플이 전체 전류 대비 더 큰 비중을 차지하여 총 고조파 왜곡률(total harmonic distortion of the current, THD)이 증가하는 현상이 두드러지게 나타난다. 이러한 전력품질 저하는 장비의 가공 정밀도, 공구 수명, 변압기 및 배전설비의 열화, 에너지 사용량 증가 등 제조 경쟁력에 직접적인 영향을 미친다.

기존 연구들은 주로 단일 인버터 부하, 조명 시스템, 유도전동기 등 개별 비선형 부하를 대상으로 역률·고조파 특성 분석이나 보상 기법을 제시한 바 있다<sup>[3,4]</sup>.

그러나 이러한 연구들은 항공 제조업과 같이 다수의 전력변환장치가 복합적으로 동작하는 고정밀 가공 장비의 실험 기반 전력품질 특성을 다루지 않으며, 복잡한 부하 변동 조건에서 전력품질의 부하 의존성을 체계적으로 분석한 사례 역시 매우 부족하다.

또한 기존의 전력품질 분석은 대부분 고가의 전력품질 측정기에 의존하여 수행되기 때문에, 생산 설비 다수가 동시에 존재하는 중소 제조업에서는 모든 장비를 상시 측정하는 것이 현실적으로 어렵다. 이러한 한계로 인해, 기본과 전류만 측정 가능한 저비용 기기(예: 클램프형 후크메타)를 활용하여 역률·총 고조파 왜곡률과 같은 주요 전력품질 지표를 추정할 수 있는 모델 개발 연구는 아직 충분히 이루어지지 않았다.

이러한 배경에서, 저비용 전류 센서 기반 전력품질 추정 모델을 확보하기 위해서는 기본과 전류와 전력품질 지표 간의 부하 의존성을 실험 데이터로 규명하는 연구가 선행되어야 한다. 이는 설비 단위의 에너지 효율 진단, 실시간 모니터링, 생산라인의 비용 효율적 전력품질 관리 체계 구축에도 중요한 기초 자료가 된다.

## 1.2 연구의 목적

본 연구의 목적은 다음과 같다. 5축 머시닝센터에서 24시간 동안 5분 간격으로 측정된 실험 데이터를 기반으로 기본과 전류와 역률, 그리고 기본과 전류의 역수( $1/I_1$ )와 총 고조파 왜곡률 간의 관계를 분석하여 전력품질의 부하 의존 특성을 규명한다. 상관성 분석을 바탕으로 기본과 전류만으로 역률과 총 고조파 왜곡률을 추정할 수 있는 저비용 측정 기반 회귀모델을 제안한다. 제안한 모델이 항공 제조업 가공 장비의 전력품질 변화 특성을 반영할 수 있는지, 대기전력 및 절삭 부하 조건에서 모델을 추가 검증하여 실효성을 실증하고, 제조 현장에서 활용 가능한 저비용 기반 전력품질 예측 모델의 가능성을 제시한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 항공 5축 머시닝센터의 전력적 특성

항공기 구조물 가공 공정은 난삭재(알루미늄·티타늄 등)를  $\mu\text{m}$  단위의 정밀도로 절삭해야 하므로, 스핀들·서보 구동계·냉각 시스템 등 다수의 전력변환장치가 동시 동작하는 고정밀 전기기계 시스템을 사용한다. 이러한 장비는 대부분 인버터, 서보 드라이브 기반의 비선형 부하로 구성되며, 운전 조건 변화에 따라 고조파 전류 발생, 역률 저하 및 전류 과형 왜곡이 나타나는 것이 특징이다. 특히 항공 제조업의 5축 머시닝센터는 고속 스핀들 제어(24,000 rpm급), 다축 위치 제어(X/Y/Z/B/C), 급유·냉각 제어 등 다수의 스위칭 장치를 포함하고 있어 부분부하 또는 무부하 상태에서는 기본과 전류가 작아지고, 이에 따라 리액턴스 영향 증가에 따른 역률 저하, 비선형 스위칭 리플 비중 증가에 따른 총 고조파 왜곡률 증가와 같은 전력품질 저하가 더 민감하게 발생한다는 특징이 있다. 이러한 전력품질 변화는 가공 정밀도, 공구 마모, 스핀들·서보의 제어 안정성, 변압기·배전설비 열화 등 제조 현장의 품질 및 설비 신뢰성에 직접적인 영향을 미치므로, 머시닝센터의 전력품질 특성을 실험 기반으로 규명하는 연구가 필수적이다.

### 2.2 전력품질의 개념

전력품질은 전력 시스템이 부하에 안정적이며 왜곡 없는 전력을 공급하는 능력을 의미한다<sup>[3]</sup>. 일반적으로 전압 변동, 주파수 편차, 역률 저하, 고조파 등의 요소가 전력 품질을 결정하며, 전력품질이 악화될 경우, 전력 손실 증가 및 설비 효율 저하, 전기·전자 장비의 수명 단축, 제어계 오동작 및 생산 품질 불안정, 배전설비 및 변압기 열화 등 이와 같은 문제가 발생할 수 있다.

비선형 부하는 스위칭 동작 및 전력 변환 과정에서 다수의 고조파 전류를 발생시키며, 이는 역률 저하와 총 고조파 왜곡률 증가의 직접적인 원인이 된다. 머시닝센터처럼 고속 제어, 정밀 위치 제어, 일정한 토크 유지가 필수적인 산업 설비에서는 전력품질 저하는 생산 품질과 장비 신뢰성을 크게 떨어뜨리는 요인이 되므로, 전력품질 분석은 필수적이다.

### 2.3 전류 정의

고조파는 기본 주파수에 대해 2배, 3배, 4배와 같이 정수의 배에 해당하는 물리적인 전기량을 말하며, 여기서  $I_1$ 은 실제 사용되는 기본과 전류,  $I_3, I_5, \dots$ 는 각 고조파 성분의 고조파 전류를 의미한다. 이렇게 기본과 전류와 고조파 전류를 모두 포함한 전체 전류의 실효값( $I_{rms}$ )은 다음과 같이 계산된다<sup>[3,7]</sup>.

$$i(t) = I_1 \sin(\omega t) + I_3 \sin(3\omega t + \phi_3) + I_5 \sin(5\omega t + \phi_5) + \dots \quad (1)$$

$$I_{ms} = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + \dots} \quad (2)$$

## 2.4 역률의 정의

역률은 전력 시스템의 효율성을 나타내는 대표적인 지표로, 실제 일을 하는 유효전력(active power, P)과 총 전력의 크기를 말하는 피상전력(apparent power, S)의 비로 정의되며, 위상차( $\phi$ )에 따라 값이 결정될 수 있다<sup>[2,4]</sup>.

$$P = \sqrt{3} VI_{1}\cos(\phi) \quad (3)$$

$$Q = \sqrt{3} VI_{ms}\sin(\phi) \quad (4)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = VI_{ms} \quad (5)$$

$$PF = \cos(\phi) = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (6)$$

위상차는 일반적으로 회로 임피던스의 리액턴스(X)와 저항(R)의 비 또는 위상차나 파형 왜곡에 의해 소모되는 무효전력(reactive power, Q)과 유효전력의 비로도 결정된다<sup>[5]</sup>.

$$\tan(\phi) = \frac{X}{R} = \frac{Q}{P} \quad (7)$$

부하에 흐르는 기본파 전류가 작다는 것은, 회로의 저항 성분이 상대적으로 작고, 리액턴스 성분이 차지하는 비중이 커짐을 의미한다. 이 경우 전압·전류 간 위상차가 증가하여 역률을 감소한다. 반대로 기본파 전류가 증가하면 저항 성분의 비중은 커지고 리액턴스 성분이 차지하는 비중이 작아져 위상차가 0으로 가까워지면 역률이 1에 수렴하는 경향을 보인다. 역률은 1에 가까울수록 공급된 전력이 유효하게 사용됨을 의미한다. 또한, 한국전력공사(한전)의 산업용 전기요금 체계에 따라 기준율을 92%로 규정하고 있으며, 이를 평균 역률이 92% 미만일 경우 역률 저하 요금(할증요금)이 부과된다. 반대로 평균 역률이 92%를 초과하는 경우에는 97%까지 초과하는데 매 1%당 기본요금 감액 혜택이 주어진다<sup>[3,6]</sup>. 즉, 산업 현장의 에너지 관리 측면에서는 역률  $\geq 0.92$ 가 필수 관리 기준으로 간주 된다. 반대로 역률이 낮을수록 동일 부하를 구동하기 위해 더 큰 기본파 전류가 필요하게 된다. 이는 배전선로 손실( $I^2R$  손실)의 증가, 변압기 부하율 상승, 전력 요금 가산 등으로 이어져 전체 시스템 효율을 저하한다.

## 2.5 총 고조파 왜곡률 정의

고조파는 기본파(60 Hz) 외의 정수배 주파수 성분이 전류 또는 전압에 중첩된 것을 말하며, 비선형 부하에 의해 발생한다<sup>[2,7]</sup>. 총 고조파 왜곡률은 전류 파형이 이상적인 정현파에서 얼마나 왜곡되었는지를 나타내는 지표로, 전류 파형 내 고조파 성분의 비율로 정의된다. IEEE Std 519-2014는 계통의 단락용량과 부하 전류 비를 고려하여 각 차수별 및 전체 고조파 전류에 대한 허용치를 제시하고 있으며, 산업 현장에서 고조파 관리의 기준으로 활용된다<sup>[8,11]</sup>.

부하가 적거나 스위칭 동작이 불안정할 경우, 총 고조파 왜곡률은 급격히 증가하는 경향을 보이며, 이로 인해 변압기 과열, 보호장치 오동작, 모터 토크 진동, 통신선 간섭 등 다양한 전력 계통 문제가 발생할 수 있다<sup>[7]</sup>. 특히 인버터, 정류기, 서보 드라이브 등 스위칭 전원을 사용하는 장비에서 고조파 발생이 두드러지며, 항공기 부품 가공 장비처럼 정밀 제어가 요구되는 산업 환경에서는 고조파 전류가 가공 정밀도와 품질에 직접적인 영향을 미칠 수 있다.

본 연구에서는 이러한 표준의 세부 허용값을 직접 평가하기보다는, 전력품질 측정기(HIOKI사 PW3360-21모델)가 제공하는 기본파 전류를 기준으로 계산된 총 고조파 왜곡률을 사용하여 5축 머시닝센터의 전력품질 특성과 부하 의존성을 분석하였다.

전력 계통 내 비선형 부하(인버터, 정류기, CNC 구동 모듈 등)는 정현파 형태의 전류 파형을 왜곡시켜 고조파가 포함된 전류를 발생시킨다. 이렇게 고조파 전류의 크기와 총 고조파 왜곡률 간에는 상관관계가 존재하는데 총 고조파 왜곡률은 고조파 성분이 기본파 전류에 대해 차지하는 비율로 정의된다<sup>[3,7]</sup>.

$$THD = \sqrt{\frac{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + \dots}{I_1^2}} \times 100(\%) \quad (8)$$

이 식에서 분모인 기본파 전류  $I_1$ 이 작아질수록, 동일한 고조파 성분이 존재하더라도 총 고조파 왜곡률은 상대적으로 크게 계산된다. 즉, 기본파의 전류가 작을수록 총 고조파 왜곡률이 증가하는 역비례 관계를 갖는다. 이는 부분부하나 무부하 상태에서 특히 두드러지며, 전력변환장치의 스위칭 동작과 선형 부하의 전류 왜곡이 상대적으로 커지기 때문이다. 또한, 부하 전류가 증가할수록 비선형 성분의 영향이 평균화되어 파형이 상대적으로 안정화되며, 결과적으로 총 고조파 왜곡률이 감소하는 경향을 보인다. 이러한 현상은 다음과 같이 근사적으로 표현할 수 있다.

$$THD \propto \frac{1}{I_1} \quad (9)$$

## 2.6 회귀분석의 개념 및 적용

회귀분석은 독립변수(X)가 종속변수(Y)에 미치는 영향을 분석

하고, 두 변수 간의 선형 관계를 수학적으로 모델링하기 위한 통계적 기법이다<sup>9,10</sup>.

$$Y = a + bX + \varepsilon \quad (10)$$

여기서 Y는 종속변수, X는 독립변수, a는 절편(intercept), b는 회귀계수(slope), ε는 오차항(error term)을 의미한다. 회귀계수 b는 X가 한 단위 변할 때 Y가 얼마나 변하는지를 나타내며, 그 부호와 크기를 통해 변수 간 관계의 방향과 강도를 해석할 수 있다. 본 연구에서 전력품질 측정기로 측정된 기본파 전류 데이터를 이용하여, 역률과 기본파 전류 그리고 총 고조파 왜곡률과 기본파 전류 간의 상관관계를 분석하였다.

역률은 전류 증가에 따라 비선형적으로 1에 근접하는 전형적인 거듭제곱 형태를 보인다. 낮은 전류 구간에서는 급격하게 증가하고 높은 전류 구간에서는 완만하게 1에 수렴함으로 거듭제곱 근사식이 적합하다.

$$PF = 1 - a I_1^b \quad (11)$$

또한 총 고조파 왜곡률은 기본파 전류가 작을수록 급격히 증가하는 역비례 형 특성을 가지므로, 이를 선형적으로 표현하기 위해 기본파 전류의 역수를 독립변수로 사용하였다.

$$THD = a + b \frac{1}{I_1} \quad (12)$$

이러한 변수 변환을 통해 두 비선형 관계를 단순 선형 회귀모형으로 근사하였다. 이러한 접근은 고가의 전력품질 측정 장비 없이도 기본파 전류 데이터만으로 에너지 효율과 전력품질을 예측할 수 있는 이론적 기반을 제공한다.

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 실험 장비 및 측정 시스템

본 연구의 실험 대상은 항공기 구조물 정밀 가공 공정에서 사용되는 APEC사의 5축 머시닝센터 SK2540 및 SK2580이며, 두 장비는 고속 스핀들(최대 24,000 rpm), X/Y/Z 직선축과 B/C 회전축을 포함한 서보 구동계, 냉각·윤활 시스템, CNC 제어 모듈 등으로 구성된 대표적인 복합 비선형 전기 부하 시스템이다. 각 장비는 3상 380 V, 60 Hz 상용 전원을 사용하며, 스핀들 인버터 및 서보 드라이브의 스위칭 동작 특성으로 인해 운전 조건에 따라 전체 전류의 실효값, 역률, 총 고조파 왜곡률의 변동 폭이 크게 나타나는 특징을 갖는다.

Fig. 1은 본 연구에서 측정 대상으로 사용된 SK2540 및



(a) SK2540



(b) SK2580



(c) Machining parts

Fig. 1 Experimental 5-axis machining centers

SK2580 장비의 외관을 나타낸다. Fig. 1(a) SK2540은 중형 스트로크 장비로 스핀들·축 구동 용량이 상대적으로 작아 전류 변동 폭이 작게 나타나는 반면, Fig. 1(b) SK2580은 더 큰 가공 영역과 고출력 스핀들을 탑재하고 있어 부하 용량이 크며 고부하 구간에서 부분부하 구간 사이의 고조파 변동성이 더 크게 나타나는 경향을 가진다. Fig. 1(c)는 알루미늄 각재를 SK2580으로 5축 가공해 제작한 항공기 크로스 빔(cross beam) 부품이다.

24시간 동안 장비는 실제 항공 부품 생산 공정에서 일반적으로 발생하는 절삭 가공, 급이송, 공구 교환, 위치 이송, 무부하 대기 등이 반복되는 복합 운전 상태로 동작하였다.

절삭(load) 상태는 스핀들 절삭력이 실제로 작용하는 구간으로, 기본파 전류가 가장 크게 상승하며 고부하 특성을 나타낸다. 혼합·전환(mixed/transition) 상태는 절삭 시작·종료, 급이송(rapid traverse), 비절삭 이송(non-cutting feed), 공정 간 위치 조정 등 다양한 동작이 연속적으로 수행되는 구간으로, 중간 수준의 전류

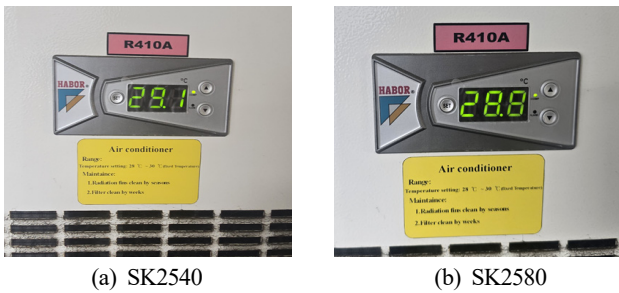
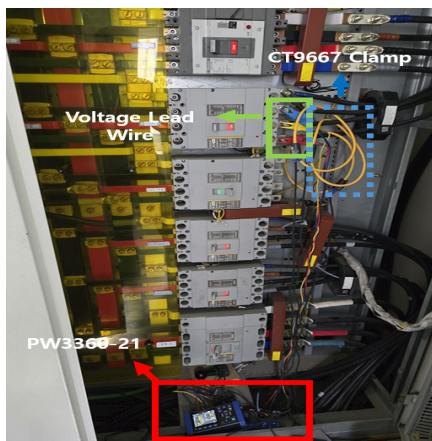


Fig. 2 Operating temperature conditions of machining centers



(a) Power quality measurement connections



(b) Real-time display of the measurement equipment

Fig. 3 Power quality measurement setup

가 관찰된다. 부분부하 상태는 절삭은 이루어지지 않지만 서보 구동, 냉각계·윤활계 작동 등 장비의 기본 동작이 지속되는 구간으로, 비교적 저 전류 범위에서 유지된다. 대기전력 상태는 절삭 및 축 이동이 거의 발생하지 않는 전원만 투입된 상태로, 가장 낮은 전류 수준을 보인다.

장비 유지보수 매뉴얼(SK2540\_KR, SK2580\_EN)에 따르면 정상적인 가공 품질을 확보하기 위한 권장 운전 온도는 약 28~30°C이며, Fig. 2는 두 장비의 실제 운전 중 온도 제어 패널 표시 값을 나타낸 것으로, 측정 당시 SK2540은 29.1°C, SK2580은 28.8°C 수준으로 정상 운전 온도 범위 내에서 실험이 이루어졌음을 나타낸다.

PW3360\_K10 Manual에 따르면 해당 장비는 전압·전체 전류 실효값, 기본파(FND) 및 40차까지의 고조파 성분, 역률, 총 고조파 왜곡률을 IEC 61000 계열 규격에 따라 동시 계산할 수 있으며, 산업용 전력품질 분석에 널리 활용된다.

Fig. 3(a)는 각 장비의 입력단에 전력품질 측정기에 연결된 전압의 리드선과 전류의 CT9667 클램프 센서의 실제 결선된 상태 모습을 보여주며, Fig. 3(b)는 전력품질 측정기로 5분 간격으로 24시간 연속 측정을 수행되는 실시간 측정 화면을 나타낸다. 이를 통해 수집된 모든 데이터는 장비 내부 알고리즘에 의해 실효값 및 기본파·고조파 성분으로 자동 처리됨을 확인할 수 있다.

### 3.2 데이터 수집

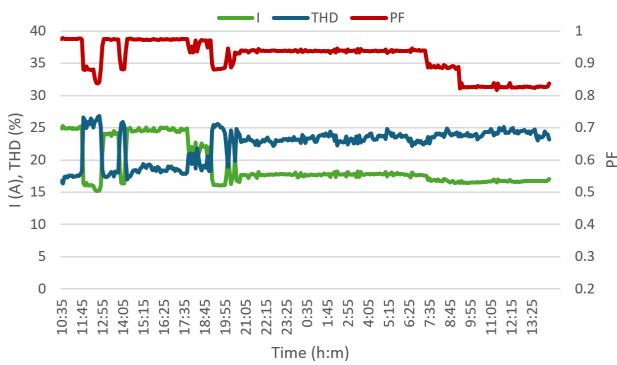
본 연구에서는 항공기 부품 가공 공정에서 사용되는 두 종류의 5축 머시닝센터(SK2540, SK2580)를 대상으로, 24시간 동안 5분 간격으로 전류와 그에 따른 역률, 총 고조파 왜곡률을 측정하였다. 한국전력에서는 스마트 계량기를 통해 하루 24시간을 15분 단위로 쪼개어 전력 사용량을 측정해 가장 큰 값이 기본요금에 반영된다. 본 연구에서는 변화를 관찰하기 위해서 15분 간격을 삼등분한 5분 간격으로 자료를 수집하였다. 각 장비에서 총 288개의 유효 데이터를 확보하였으며, 측정된 전류 패턴에는 실제 생산 공정에서 자연스럽게 발생하는 다양한 운전 상태가 혼재되어 나타났다.

먼저, 절삭 가공 공정은 스핀들 회전, 축 이동, 절삭 부하가 동시에 발생하는 주 운전 상태로, 기본파 전류가 가장 큰 폭으로 증가하고 변동성이 두드러진다. 부하가 증가할수록 역률은 1에 가까워지는 경향을 보이며, 총 고조파 왜곡률은 오히려 감소하는 전형적인 비선형 부하 특성을 나타낸다.

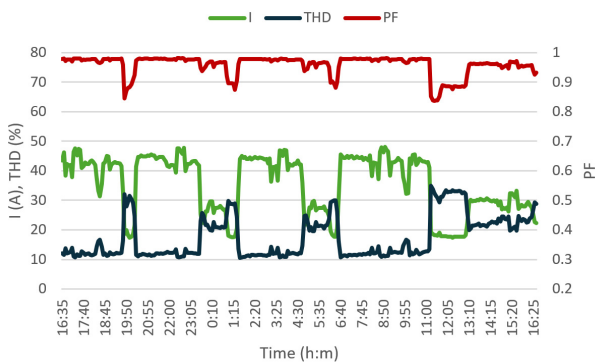
혼합·전환 상태 구간은 절삭 시작·종료, 급이송, 비절삭 이송, 공정 간 위치 조정 등 다양한 동작이 연속적으로 수행되는 구간으로 절삭과 비절삭 상태 사이에서 장비가 빠르게 모션을 전환하는 과정에서 나타나는 특성이다. 이 구간에서는 축 구동계의 이동량과 속도가 변동함에 따라 기본파 전류가 단시간에 증가하거나 감소하는 패턴을 보이나, 절삭 부하가 직접적으로 작용하지 않기 때문에 고조파 발생 메커니즘이 급격히 변하지 않아 총 고조파 왜곡률의 변화 폭은 상대적으로 좁게 유지된다.

반면 부분 부하 상태는 서보 구동, 냉각계·윤활계 작동 등 장비의 기본 동작이 지속되는 구간으로 대기전력 상태와 비교하면 기본파 전류가 유의미하게 증가한다. 그러나 절삭 공정에 비해서는 상대적으로 낮은 전류 범위를 유지하며 변동 폭 또한 제한적으로 나타난다.

대기전력 상태의 경우, 장비에 전원이 투입되어 있으나 스핀들 회전, 축 이동, 냉각·윤활 동작 등 어떤 기능도 수행하지 않는 순수



(a) Time-series power quality data of the SK2540



(b) Time-series power quality data of the SK2580

Fig. 4 24-hour power quality measurements of the machining

비동작 상태를 의미한다. 이 경우 기본과 전류는 매우 낮은 수준에서 거의 일정하게 유지되며, 전류 변동 폭이 작고 역률과 총 고조파 왜곡률 역시 매우 완만한 패턴을 보인다.

#### 4. 실험결과 및 회귀분석

##### 4.1 전류 및 전력품질 패턴 관찰

본 연구의 실측 데이터를 해석하면, SK2540과 SK2580 두 장비는 구조와 용량의 차이로 인해 전류의 값과 변동 패턴에서도 상당한 차이를 보인다.

Fig. 4(a)에서는 SK2540은 중형 장비로서 절삭 가공이 수행될 때 기본과 전류가 약 25 A까지 상승하며 뚜렷한 고부하 패턴을 나타낸다. 반면, 절삭이 이루어지지 않는 부분부하 구간에서는 전류가 약 15~18 A 수준으로, 이는 스핀들 절삭력이 작용하지 않는 상태에서 냉각계, 제어계, 저부하 구동계가 동작하는 준대기 단계로 해석된다. 또한, 절삭 가공과 부분부하 전환과정에서 약 20~23 A 범위의 전형적인 중간 전류 구간 패턴도 관찰하였다.

역률은 절삭 부하가 작용하는 기본과 전류 25 A 구간에서 약 0.97 수준을 유지하며 우수한 전력 품질을 보인다. 그러나 부분부하로 전환될 때는 0.97에서 0.88 수준으로 단계적으로 저하되는 현

상이 나타난다. 특히 그래프 후반부에서는 기본과 전류가 16~18 A 사이 부근에서는 일정하게 유지됨에도 불구하고 역률이 0.94 → 0.88 → 0.82 수준으로 계단형으로 낮아지는데, 이는 제어계 부하의 무효전력 비중이 증가하면서 나타날 수 있는 전형적인 현상이다.

총 고조파 왜곡률은 기본과 전류의 크기에 따라 뚜렷한 반비례 관계를 보인다. 절삭 가공이 이루어지는 고부하 구간인 25 A에서는 고조파 왜곡률이 약 16% 수준까지 최대로 낮아지는 것을 확인하였다. 반대로 기본과 전류가 약 15 A의 저부하 구간으로 떨어지면 총 고조파 왜곡률은 27% 수준까지 증가하여, 기본과 전류 감소와 총 고조파 왜곡률 상승이 명확한 반비례 경향을 형성함을 확인하였으며, 이는 부하가 작아질수록 전체 전류에서 고조파 성분이 상대적으로 커지는 인버터 기반 장비의 전형적인 특성으로 해석될 수 있다.

한편, 약 20~23 A 수준의 구간인 혼합·전환 상태 구간에서는 기본과 전류가 빠르게 변화함에도 총 고조파 왜곡률의 변동 폭은 상대적으로 좁게 나타났다. 이는 절삭 부하가 직접 작용하지 않아 고조파를 유발하는 비선형 전류 성분이 상대적으로 적기 때문에, 기본과 전류는 빠르게 변하더라도 총 고조파 왜곡률의 변동은 제한적으로 유지된다.

Fig. 4(b)에 제시된 SK2580의 24시간 전력품질 데이터는 SK2540과 동일한 유형의 패턴을 보이지만, 더 큰 가공 영역과 고출력 스핀들을 탑재하고 있어 전류의 절대적 크기와 변동 폭이 더 크게 나타난다.

절삭 공정이 수행될 때 기본과 전류가 약 30~48 A 범위까지 크게 상승하여 뚜렷한 고부하 패턴을 형성한다. 반면, 절삭이 이루어지지 않는 상태에서는 기본과 전류가 약 17 A 수준으로 크게 감소하며, 이 구간은 스핀들 회전이 정지하고 냉각·윤활 시스템 및 최소한의 제어계만 유지되는 부분부하 혹은 준대기 상태로 분류된다. 또한, 절삭 공정 사이 전환부, 즉 공정 위치 이동·공구 접근·급이송이 수행되는 혼합·전환 상태에서는 전류가 약 22~30 A 범위 내에서 반복되는 모습도 관찰되었다.

역률 값에서도 전류 패턴과 밀접한 상관성이 나타났다. 고부하 절삭 구간에서는 역률이 0.98에 근접한 고 역률 상태를 유지하는 반면, 절삭이 종료되고 부분부하 상태인 준대기 상태로 전환되면 역률은 약 0.84 수준까지 급격하게 하락한다. 이는 스핀들 및 축 구동계의 실효 부하가 사라지면서 제어계 기반의 무효전력 비중이 상대적으로 증가하기 때문이며, 고용량 인버터 기반 장비에서 일반적으로 관찰되는 과도적 특성이다.

총 고조파 왜곡률도 SK2540과 마찬가지로 기본과 전류와 뚜렷한 반비례 경향을 나타낸다. 절삭이 수행되는 고부하 구간에서는 총 고조파 왜곡률이 약 10~15% 범위로 낮게 유지되며, 이는 부하 전류가 커짐에 따라 고조파 성분의 상대적 비율이 감소하는 비선

형 부하의 대표적 특성이다. 반면, 부분부하 또는 준대기 상태에서 기본과 전류가 17A 수준으로 낮아지면 총 고조파 왜곡률이 30~33% 범위로 크게 상승하며, 전체 전류에서 고조파 성분의 상대적 비중이 증가함을 확인할 수 있다.

혼합·전환 구간(약 20~30 A 영역)에서도 총 고조파 왜곡률의 변화 폭이 절삭과 부분부하 사이 변화 폭보다 상대적으로 좁게 나타난다. 이는 절삭 부하가 직접 작용하지 않아 고조파를 유발하는 비선형 전류 성분이 크게 증가하지 않았기 때문이다.

이와 같은 경향은 SK2540과 동일한 물리적 원리를 따르나, SK2580이 더 큰 인버터 용량과 더 복잡한 축 제어 시스템을 사용함에 따라 총 고조파 왜곡률 변동 폭이 더 크고 국소적 PEAK가 더 자주 발생하는 특징을 보인다.

이와 같이 두 장비 모두 기본과 전류의 변화가 장비의 운전 상태를 명확히 반영하고 있으며, 역률과 총 고조파 왜곡률은 이러한 부하 변화에 따라 체계적으로 반응한다. Fig. 4의 시계열 데이터는 산업 현장의 실제 가공 공정에서 비선형 부하 특성이 시간에 따라 어떻게 변화하는지를 보여줄 뿐만 아니라, 본 연구에서 제안한 기본과 전류 기반 전력품질 예측 모델이 다양한 운전 조건을 정량적으로 설명할 수 있는 근거를 제공한다.

종합하면, 본 연구에서 수집된 24시간 전력품질 데이터는 실제 항공 제조 현장의 공정 특성이 반영된 혼합 패턴을 포함하고 있으며, 각 기본과 전류의 크기의 변동성에 따라 역률 및 총 고조파 왜곡률 역시 서로 다른 양상으로 변화한다.

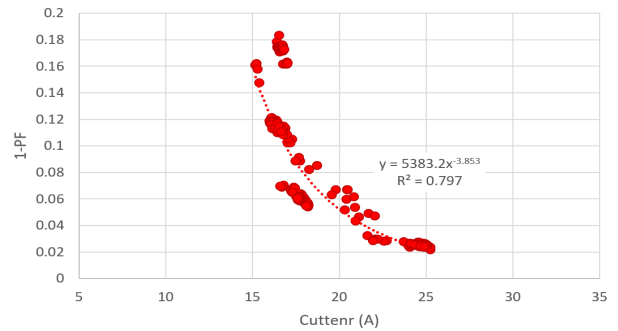
#### 4.2 기본과 전류와 역률 간의 관계

Fig. 5의 (a), (b)는 각각 SK2540과 SK2580 장비의 기본과 전류와 1-PF 간의 산점도 및 회귀선을 나타낸 것이다. 두 장비 모두 기본과 전류 증가에 따라 1-PF 값이 비선형적으로 감소하는 전형적인 거동제공 감쇠 형태를 보였으며, 이는 전류 증가 시 역률이 1에 점차 근접하는 비선형 부하의 전형적 패턴과 일치한다. 회귀분석 결과, 기본과 전류와 PF간의 회귀식은 다음과 같다.

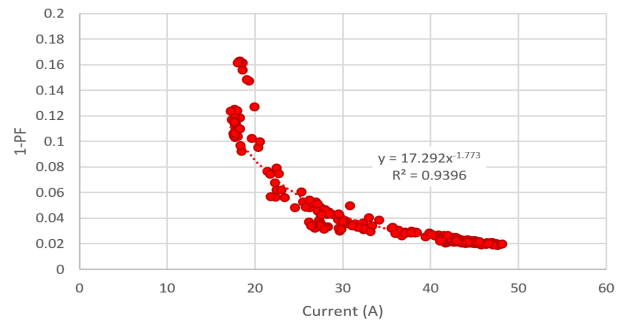
$$\text{SK2540: PF} = 1.0 - 5383.2 \times I_1^{-3.853} \quad (13)$$

$$\text{SK2580: PF} = 1.0 - 17.292 \times I_1^{-1.773} \quad (14)$$

SK2540 장비의 회귀식은 식 (13)과 같으며, 결정계수  $R^2 = 0.797$ 로 높은 적합도를 나타내, 기본과 전류가 역률 변동을 안정적으로 설명하고 있음을 확인하였다. 저부하 구간(약 15~18 A)에서는 데이터 분산이 상대적으로 크게 나타났는데, 이는 부하가 작을수록 리액티브 성분의 비중 증가로 인해 역률 반응이 불안정해지는 전형적 비선형 특성에 기인한다.



(a) Fundamental current vs. 1 - PF for SK2540



(b) Fundamental current vs. 1 - PF for SK2580

**Fig. 5 Regression results between fundamental current and power factor**

SK2580 장비의 회귀식은 식 (16)과 같으며, 결정계수  $R^2 = 0.9396$ 로 SK2540 대비 더 높은 설명력을 보였다. 그래프에서 데이터점들이 회귀선 주변에 고르게 분포하여 모델의 선형성 가정이 적절함을 뒷받침한다. SK2580은 고출력 스펀들과 큰 가공 영역을 하고 있어 부하 변화가 더 넓은 범위에서 발생하므로, 전류 증가에 따른 역률 개선 경향이 더 안정적으로 나타났다.

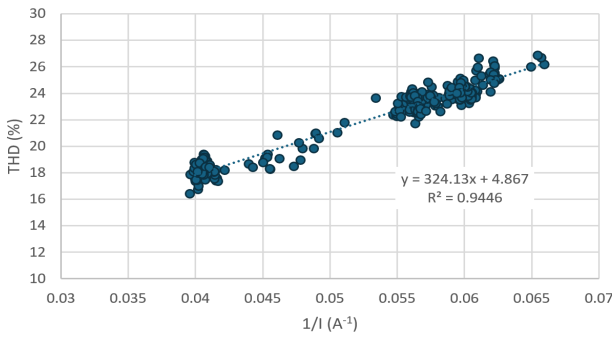
Table 1 두 장비의 회귀계수 차이는 부하 용량 및 구동계 구조 차이에 따른 것으로 해석된다. SK2540은 상대적으로 작은 구동 용량을 갖기 때문에 전류 변화에 민감하게 반응하여 기울기가 크게 나타났고, SK2580은 부하가 크고 안정적이어서 변화율이 완만하게 나타났다. 이러한 결과는 기본과 전류만으로도 역률의 개선·저하 경향을 정량적으로 예측할 수 있음을 의미하며, 저비용 전류 기반 센서를 활용한 산업용 전력품질 관리 모델로의 확장 가능성을 제시한다.

#### 4.3 기본과 전류의 역수와 고조파 전류 외형률 간의 관계

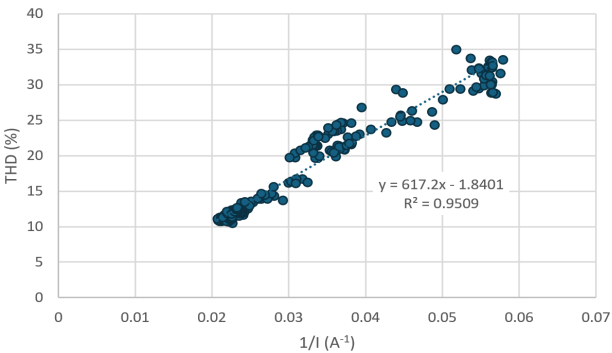
기본과 전류의 역수와 총 고조파 왜곡률 간의 회귀식은 다음과 같다.

$$\text{SK2540: THD} = 4.867 + 324.13 \times (1/I_1) \quad (15)$$

$$\text{SK2580: THD} = -1.840 + 617.19 \times (1/I_1) \quad (16)$$



(a) THD vs.  $1/I_1$  for SK2540



(b) THD vs.  $1/I_1$  for SK2580

**Fig. 6 Regression between the reciprocal of fundamental current and total harmonic distortion of the current**

Fig. 6의 (a), (b)는 각각 SK2540과 SK2580 장비에 대해 기본과 전류와 총 고조파 왜곡률 간의 산점도와 회귀선을 나타낸 것이다. 두 장비 모두 기본과 전류의 역수가 증가할수록(즉, 기본과 전류가 감소할수록) 총 고조파 왜곡률이 선형적으로 증가하는 뚜렷한 경향을 보였으며, 이는 저부하 구간에서 고조파 전류 왜곡이 급격히 커지는 비선형 부하의 전형적인 특성을 잘 반영한다.

SK2540의 회귀 분석 결과, 결정계수는  $R^2 = 0.9485$ 로 매우 높은 적합도를 보였고, 두 변수 간 상관계수 역시 0.9733으로 분석되어 기본과 전류의 역수가 총 고조파 왜곡률 변화를 강하게 설명하는 인자임을 확인할 수 있었다. 저부하 영역( $1/I_1$  값이 큰 구간)에서 총 고조파 왜곡률이 급격하게 증가하는 모습은 부하 전류가 작을수록 인버터 및 서보 구동계의 스위칭 리플 성분이 전체 전류에서 차지하는 비중이 커지기 때문으로 해석된다.

SK2580 경우에도 결정계수  $R^2 = 0.9508$ , 상관계수 = 0.9771로 SK2540과 유사하거나 더 높은 수준의 설명력을 보였다. Table 1 회귀식의 기울기(617.19)가 SK2540(324.13)에 비해 약 2배 정도 크게 나타나, 동일한 기본과 전류의 역수 변화에 대해 SK2580의 총 고조파 왜곡률이 더 민감하게 증가함을 알 수 있다. 이는 SK2580이 고회전 스피드와 대용량 전력변환기를 사용하는 장비로서, 저부하 운전 시 스위칭에 따른 비선형 특성이 더 강하게 나타나는 결과로 해석된다.

**Table 1 Regression results of PF and THD models**

Machine	Model	a	b	$R^2$
SK2540	PF	5383.2	-3.853	0.9790
SK2580	PF	17.292	-1.773	0.9396
SK2540	THD-F <sub>I</sub>	4.867	324.13	0.9485
SK2580	THD-F <sub>I</sub>	-1.840	617.19	0.9508

종합적으로 보면, 두 장비 모두 기본과 전류가 감소할수록 총 고조파 왜곡률이 크게 증가하는 경향을 나타내며, 기본과 전류의 기반 회귀모델은 저부하 조건에서의 고조파 악화 정도를 정량적으로 예측하는 데 높은 신뢰성을 제공한다. 이는 고가의 전력품질 분석 장비 없이도 기본과 전류만 측정하여 저부하 운전 구간의 고조파 리스크를 사전에 진단하고, 에너지 효율 및 설비 수명을 고려한 운전 조건 최적화에 활용할 수 있음을 시사한다.

## 5. 검증 실험 및 고찰

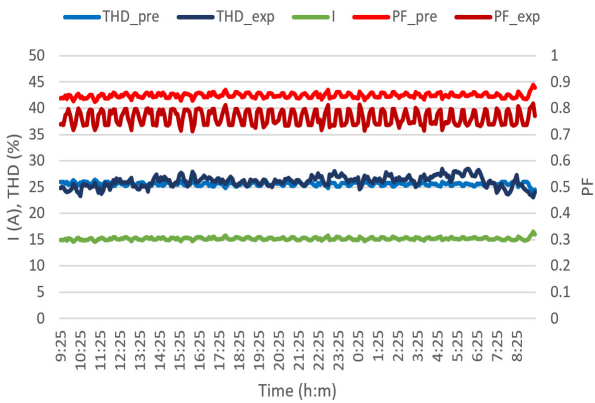
앞선 측정 데이터와 회귀모델의 신뢰성을 검증하기 위해, 동일한 측정 조건에서 대기전력 상태(SK2540) 및 운전 부하 상태(SK2540, SK2580)에 대한 추가 실험을 수행하였다. 각 조건에서 24시간 동안 5분 간격으로 실험값(experiment)을 수집하였고, 이를 회귀모델을 통해 산출된 예측값(predict)과 비교하였다.

### 5.1 대기 전력 상태 실험(SK2540)

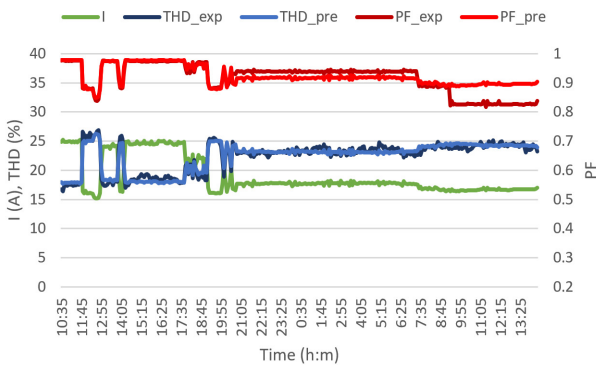
Fig. 7(a)의 대기전력 실험은 SK2540 장비가 Tool Gripper 20 개 교체 작업을 준비하는 과정에서 24시간 이상 대기상태로 유지된 상황을 측정하는 것이다. 이 구간에서는 절삭 작업, 축 이동, 급이송 등이 발생하지 않으며, 냉각계·제어계의 기본 구동만 유지되는 순수 대기상태였다.

대기상태의 기본과 전류는 평균 약 15 A 이하이지만, 그래프 후반부인 익일 08:30 이후부터 자동 점검 및 냉각 계통의 보정 동작으로 인해 약 16 A까지 미세하게 상승하는 구간이 관찰된다. 이는 Tool Gripper 교체를 위한 준비 과정에서 장비 내부에서 자동 점검, 윤활·냉각 시스템의 주기적 보정 동작 등이 일시적으로 수행되었기 때문으로 분석된다. 이러한 동작은 절삭 공정은 아니지만, 대기상태에서 흔히 발생하는 준비 동작으로, 기본과 전류의 미세한 증가를 자연스럽게 유발할 수 있다. 대기전력 상태에서는 부하 변동이 극히 작아서 실험값의 분산이 매우 작으며, 이러한 조건에서는 상관계수보다 오차 기반의 지표가 모델 성능을 평가하는 데 적합하다.

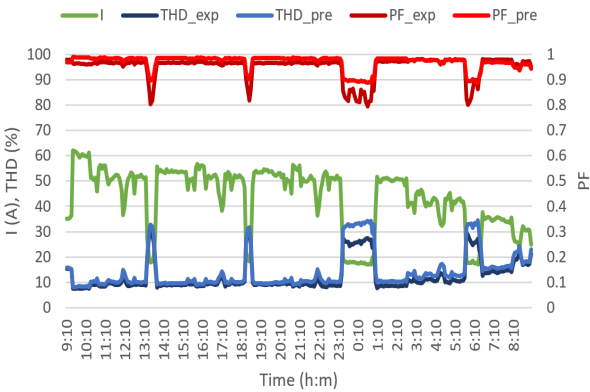
역률의 경우, 실험값(PF<sub>exp</sub>)은 약 0.75~0.80 수준에서 약 35분 주기로 미세하게 진동하는 패턴을 보인다. 대기 상태의 평균



(a) Time-series comparison of current, THD, and PF during standby operation (SK2540)



(b) Time-series comparison of current, THD, and PF during machining-load operation (SK2540)



(c) Time-series comparison of current, THD, and PF during machining-load operation (SK2580)

**Fig. 7 Time-series comparison of current, THD, and power factor under standby and machining-load operations of the machining centers**

전류는 약 15 A 수준으로 매우 낮기 때문에, 보조 장치의 간헐적 가동으로 발생하는 1~2 A 내외의 미세한 전류 변화가 PF 진동 현상을 만들어낸다. 반면, 전류 크기에 기반한 회귀 모델의 예측값 (PF\_pre)은 약 0.85 수준의 일정한 값을 유지하며 실험값보다 약 0.05~0.1 높게 산출되었다.

총 고조파 왜곡률 역시 부하 변동이 제한적인 대기상태의 특성 상 약 24~27% 범위에서 안정적인 패턴을 유지하였다. 예측값 (THD\_pre)은 전체적인 평균 추세는 잘 추종하였으나, 실험값 (THD\_exp)에서 관찰되는 주기적인 등락까지는 완벽히 재현하지 못하였다. 특히 03:45~07:05 구간에서 발생하는 국부적인 오차는 해당 장비가 유휴 상태임에도 불구하고, 전력계통을 공유하는 공장 내 타 설비로부터 유입된 고조파 간섭이 실험값에 포함되었기 때문으로 추정된다.

대기 상태에서는 부하 변동폭이 극히 작아 상관계수를 통한 평가보다는 수치 차이를 직접적으로 나타내는 오차 기반의 지표가 적합하다. 평균 절대 오차(Mean Absolute Error, MAE)는 PF 0.085와 THD 0.929%로 각각 계산되어, 모델이 저부하 조건에서 안정적인 예측 성능을 유지하고 있음을 확인했다.

### 5.2 운전 부하 상태 실험(SK2540)

Fig. 7(b)는 실제 가공 공정 중 발생하는 부하 변동에 따른 기본 파 전류(I), 총 고조파 왜곡률(THD), 그리고 역률(PF)의 시계열 변화를 나타낸 것이다. 해당 실험은 장비가 실제 운전되는 환경에서 측정되었으며, 공정의 진행 단계에 따라 각 전력품질 지표가 유기적으로 변화하는 양상을 확인할 수 있다. 그래프 분석 결과, 가공이 활발히 진행되는 고부하 구간에서 I는 약 25 A 수준까지 상승하며, 이에 따라 PF 또한 0.95~0.98의 높은 수치를 안정적으로 유지하는 것으로 나타났다. 반면, 공구의 위치 이동이나 대기 상태가 포함된 부분 부하 구간에서는 전류가 약 15~18 A 수준으로 급격히 감소하며, 이와 동시에 역률이 0.82~0.88 범위까지 일시적으로 하락하는 패턴이 반복적으로 관찰되었다. 특히 오전 11시 45분에서 14시 사이, 그리고 오후 18시 45분 이후의 구간에서 부하 변동에 따른 역률의 등락이 두드러지게 나타나며, 이는 가공 부하의 크기가 전력품질 지표에 직접적인 영향을 미치고 있음을 시사한다.

21:05 이후 구간은 절삭 가공이 종료된 대기상태로 전환됨에 따라 기본파 전류 I가 약 17~18 A 수준의 낮은 수치에서 일정하게 유지되는 양상을 보인다. 이 구간에서 예측 모델 PF\_pre은 입력된 전류 및 운전 조건을 바탕으로 약 0.90 수준의 일정한 역률을 유지할 것으로 추정하였다. 그러나 실제 측정값인 PF\_exp를 살펴보면, 익일 08:45 이후 시점에서 예측치와 달리 역률이 약 0.82 수준으로 급격히 하락한 뒤 낮은 상태를 지속하는 특이 현상이 관찰되었다. 이 시기에 전류의 유의미한 변화가 없음에도 역률만 하락한 것은, 모델에 포함되지 않은 장비 내 보조 유틸리티의 운전으로 인한 무효전력의 증가가 원인인 것으로 추정된다.

이러한 현상은 Fig. 8(a)의 역률 산점도(scatter plot) 분석에서도 명확히 드러난다. 대다수의 데이터 포인트가 이상적 라인

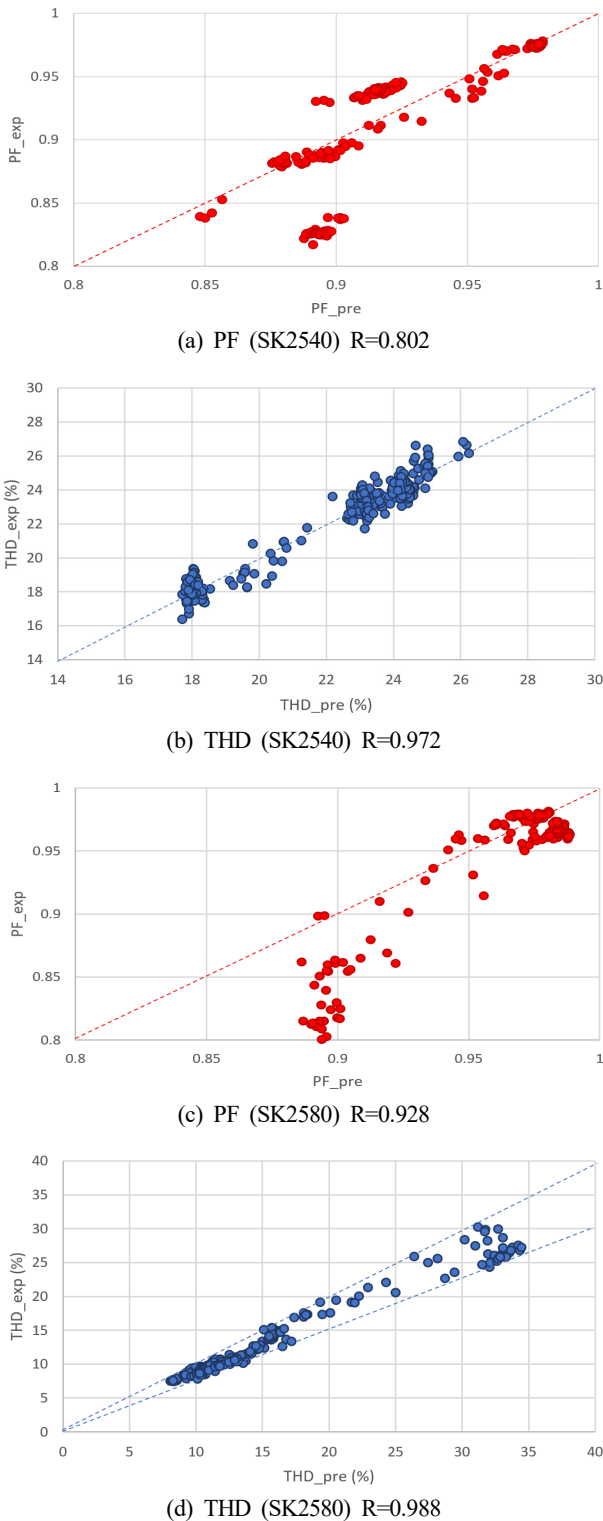


Fig. 8 Prediction and verification experiment scatter plot of the machining centers

(PF\_exp=PF\_pr)을 따라 밀집되어 있고 상관계수 R은 0.802로 산출되어 전반적인 예측성능은 우수하지만, PF\_pre가 0.88~0.90 부근임에도 불구하고 PF\_exp가 0.82 내외에 머무는 데이터 군집

이 별도로 형성된 것을 확인할 수 있다.

이는 앞서 언급한 08:45 이후의 대기 구간 편차가 반영된 결과이다. 이러한 불일치는 전류 기반 단일 변수 모델의 한계점을 보여주며, 전반적인 경향성 파악에는 무리가 없음을 확인하였다.

반면, Fig. 8(b) THD 산점도의 경우 모든 데이터 포인트가 회귀선을 중심으로 고르게 분포하고 있고 상관계수 R은 0.972로 산출되어, 부하 변동 및 대기 구간 전반에 걸쳐 모델이 고조파 왜곡률의 변화를 매우 정밀하게 추종하고 있음을 보여준다.

결과적으로 제안된 회귀 모델은 가공 공정 전반의 전력품질 지표를 신뢰성 있게 예측하지만, 장비의 특정 보조 시스템 동작에 따른 미세한 역률 변동까지 포착하기 위해서는 향후 세부 운전 모드를 독립 변수로 추가하는 모델 고도화가 필요할 것으로 보인다.

### 5.3 운전 부하 상태 실험(SK2580)

Fig. 7(c)는 SK2580 장비의 실제 가공 공정 중 측정된 전력 데이터의 시계열 변화를 보여준다. 해당 장비는 앞선 SK2540 장비보다 높은 부하 수준에서 운전되었으며, 가공 조건에 따라 전류와 전력품질 지표가 매우ダイナ믹하게 변화하는 특징을 보인다. 이 장비는 절삭 시작과 종료, 급이송 구간, 공정 간 위치 이동 등 다양한 부하 변동을 포함하고 있으며, 이에 따라 기본과 전류와 전력품질 지표의 시간 변화도 대기 상태보다 훨씬 크게 나타난다.

Fig. 7(c)에서 대형 5축 머시닝센터에서 항공기 구조물 가공 중 측정된 전류 신호는 가공 조건 및 공정 상태에 따라 뚜렷한 수준 차이를 보이며, 절삭 가공이 수행되는 구간에서는 기본과 전류가 약 45~60 A 수준까지 상승하여 고부하 절삭 패턴을 나타낸다. 반면, 절삭이 이루어지지 않는 이송 및 대기 구간에서는 전류가 약 18 A 수준으로 감소하며, 이는 스핀들이 공작물과 접촉하지 않은 상태에서 냉각계, 제어계, 축 구동계 등 보조 시스템만이 동작하는 준대기 단계로 해석할 수 있다. 또한, 새벽 3시 이후 절삭 구간의 전류가 점차 감소해 30 A 까지 감소하는 것은 남은 절삭량이 감소하면서 절삭 부하가 줄어들기 때문이다.

가공이 수행되는 고부하 구간에서는 역률이 0.95~0.98의 높은 수준을 유지하며 안정적인 전력 효율을 보이지만, 가공 준비 및 대기상태인 저 부하 구간에서는 역률이 일시적으로 0.80 부근까지 하락하는 패턴이 관찰되었다. 예측 모델은 고부하 구간의 역률을 정밀하게 추종하였으나, 저부하 구간에서는 실험값이 0.80까지 하락함에도 불구하고 예측치는 0.90 수준에 머물러 일정 부분 편차가 발생하였다.

Fig. 8(c) 산점도 분석 결과에도 PF 예측 0.9 부근에서 실제 측정 값은 0.8~0.85로 작은 것을 볼 수 있다. 다른 부분은 예측과 검증 실험이 일치해 상관계수 R은 0.928로 높게 산출되었다. 앞선

장비에서 나타났던 대기 구간의 특정 편차 현상이 SK2580 장비에서는 상대적으로 적게 관찰되었으며, 제한한 회귀모델이 부하 변동이 큰 운전 조건에서도 역률의 변화 경향을 신뢰성 있게 추정할 수 있음을 보여준다.

총 고조파 왜곡률은 절삭 공정 특성에 따라 8~30% 범위에서 크게 진동하는 모습을 보였으며, 이는 인버터 기반 구동 시스템에서 절삭 부하, 회전 속도 변화, 급이송 등의 동작이 복합적으로 작용해 전류 파형의 비선형성이 증가하기 때문으로 해석된다. Fig. 8(d) 산점도 그래프에서, 해당 구간을 포함한 전체 상관계수는 0.988로 나타나, 모델이 고조파전류 왜형률을 정량적으로 높은 정확도로 추정하고 있음을 확인할 수 있었다. 특히 부하가 낮은 구간에서 발생하는 30% 이상의 높은 고조파 왜곡 상황에서 예측값(THD\_pre)이 실험값(THD\_exp)의 비선형적 증가 추세를 선형적 상관관계 범위 내에서 안정적으로 추정하고 있음을 확인하였다.

#### 5.4 전력품질 특성 종합 및 고찰

검증 실험 결과를 종합해 볼 때, 제안된 기본과 전류 기반 회귀 모델은 Table 2와 같이 대기상태와 운전 부하 상태라는 극단적으로 대비되는 조건 모두에서 실용적인 예측성을 확보하였음을 확인하였다. 특히 부하가 급변하는 실제 절삭 공정에서는 전력품질 지표의 동적 변화를 높은 정확도로 추적하였다. 비록 특정 구간(대기상태의 미세 변동 등)에서 모델이 포착하지 못한 오차가 존재하지만, 이는 장비의 세부 운전 모드를 변수로 보완함으로써 향후 고도화가 가능할 것으로 판단된다.

이러한 결과는 머신닝센터의 전력품질 특성이 기본과 전류(I)라는 단일 물리량과 매우 밀접하게 연계되어 있음을 시사한다. 통계적 검증을 통해 확인된 바와 같이, 전류의 크기 변화는 역률 저하 및 고조파 왜형률 증가와 선형 혹은 비선형적 상관관계를 형성한다. 이는 부분 부하 구간에서 비선형 부하 특성으로 인해 고조파 왜곡과 역률 저하가 두드러진다는 기존 선행 연구의 이론적 가설을 실제 산업 현장의 데이터로 실증했다는 점에서 학술 가치가 크다.

공학적 측면에서의 성과는 복잡한 연산이 필요한 고가의 전력품질 분석 장비 없이도, 비교적 수집이 쉬운 기본과 전류 데이터만으로 장비의 전력 상태를 정량화할 가능성을 제시한 것이다. 산업 현장의 모든 설비에 고가의 분석기를 부착하는 것은 현실적으로 불가능하나, 본 모델을 활용하면 저비용의 전류 센서만으로도 광범위한 설비 모니터링 체계를 구축할 수 있다. 제안된 모델은 정밀 분석 전 단계에서 전력품질의 이상 징후를 탐지하거나 부하 상태를 판별하는 1차 진단(pre-screening) 도구로서 우수한 성능을 발휘할 수 있다.

Table 2 Summary of predictive model performance

Experimental condition	Metric	Power factor (PF)	THD (%)	Remarks
Standby (SK2540)	MAE	0.085	0.929	Stable load (I=15 A)
Operating (SK2540)	R	0.802	0.972	High dynamic range
Operating (SK2580)	R	0.928	0.988	High load (up to 60 A)

## 6. 결론

본 연구에서는 항공기 부품 가공용 5축 머신닝센터를 대상으로 24시간 동안 수집한 전력품질 데이터를 기반으로, 기본과 전류와 역률(PF), 총 고조파 왜곡률(THD) 간의 상관성을 분석하였다. 분석 결과, 기본과 전류가 증가할수록 역률은 1에 근접하는 경향을 보였으며, 기본과 전류의 역수가 증가할수록 총 고조파 왜곡률이 상승하는 뚜렷한 상관관계를 나타냈다. 두 회귀모델 모두  $R^2 \geq 0.94$ 의 높은 설명력을 보였으며 모든 회귀계수는 유의수준  $\alpha = 0.05$ 에서 통계적으로 유의함을 확인하였다.

검증실험에서 부하 변동이 극히 적은 대기 전력 상태(SK2540)에서는 상관계수보다 오차 기반 지표 MAE를 통해 PF 0.085, THD 0.929로 모델의 안정적인 재현성을 확인하였다. 복잡한 가공 공정이 포함된 운전 부하 상태(SK2540)에서 모델은 PF 0.802, THD 0.972의 높은 상관계수(R)를 기록하며, 부하 급변 구간에서도 전력품질 지표의 동적 변화를 정밀하게 추종하였다. 대형장비 SK2580의 경우, 60 A 이상의 고 부하 구간뿐만 아니라 고조파 왜곡이 심화되는 저 부하 구간에서도 강건한 예측성을 보이며, PF 0.928, THD 0.988의 높은 상관계수를 기록하였다. 이는 기본과 전류만을 활용한 전력품질 예측의 가능성과 함께, 모델이 부하 변동이 존재하는 실제 산업 환경에서도 안정적으로 동작함을 보여준다.

본 연구의 주요 학술적 기여는 고가의 전력품질 분석 장비가 아닌 기본과 전류 측정 데이터만으로도 역률 및 고조파 왜형률의 변동 특성을 정량적으로 예측할 수 있음을 실증한 것이다. 이는 항공 제조업과 같이 복합 비선형 부하가 존재하는 산업 분야에서 실험 기반 자료가 부족했던 기존 연구의 한계를 보완하고, 저비용 기반 전력품질 예측 모델의 현장 적용 가능성을 제시한다.

다만, 본 연구는 두 종류의 머신닝센터를 대상으로 한 단일 사업장 기반 사례 연구라는 한계가 있으며, 설비별 운전 패턴, 공정 조건, 환경 요인 등 다변량 요인을 포함하지 못하였다. 향후 연구에서는 다양한 동작기계와 부하 조건을 포함한 다변량 예측 모델을 개발하고, 이를 실시간 모니터링과 연계하여 지속 가능한 제조공정의 에너지 관리 체계로 확장할 계획이다.

## 후 기

이 연구는 경상국립대학교 글로컬대학 30 프로젝트의 지원을 받아 수행되었습니다.

## References

- [1] Kim, J. M., Kim, J. G., Park, Y. J., 2016, Analysis Relationships Between Current and Power Factor Caused by Harmonics, Proceedings of KIIEE Annual Spring Conference., 23-23, <<https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE06688305>>.
- [2] Yu, H. M., Choi, J. W., Choe, S. H., 2013, Power Quality Measurement for LED-based Green Energy Lighting Systems, Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers., 50:2 174-184, <https://doi.org/10.5573/ieek.2013.50.2.174>.
- [3] Song, J. W., 2025, Power Quality Improvement Plan for Public Sewage Treatment Facility Efficiency, Electrical World., 74:3 37-44, <<https://www.dbpia.co.kr/Journal/articleDetail?nodeId=NODE12094224>>.
- [4] Kim, J. G., 2025, Study on Comparison and Optimization of Power Factor Compensation Methods According to Operating Conditions of Induction Motors, The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, 74:8 1412-1417. <https://doi.org/10.5370/KIEE.2025.74.8.1412>.
- [5] Kook, K. S., Rho, D. S., 2011, Dynamic Model Based Ratio Calculation of Equivalent Reactance and Resistance of the Bulk Power Systems, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 12:6 2739-2746, <https://doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.6.2739>.
- [6] Korea Electric Power Corporation, 2024, viewed 29 March 2026, Basic Supply Terms and Conditions, KEPCO Articles 41-43, <<https://online.kepcoco.kr/TEM022D00>>.
- [7] Rho, D. N., Eo, I. S., 2012, Analysis of the Harmonics on the Power Line in the Computer Room, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 13:12 6052-6059, <http://doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.12.6052>.
- [8] Kang, S. G., 2025, Analysis of Harmonic Characteristics and Filter Application for Harmonic Mitigation in Detached Houses, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, 39:5 371-381. <http://doi.org/10.5207/JIEIE.2025.39.5.371>.
- [9] Khodapanah, M., Zobaa, A. F., Abbod, M., 2018, Estimating Power Factor of Induction Motors at Any Loading Conditions Using Support Vector Regression (SVR), Electr. Eng., 100 2579-2588, <https://doi.org/10.1007/s00202-018-0723-7>.
- [10] Sykes, A. O., 1993, An Introduction to Regression Analysis, <[https://chicagounbound.uchicago.edu/law\\_and\\_economics/51/](https://chicagounbound.uchicago.edu/law_and_economics/51/)>.
- [11] IEEE, 2014, IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, IEEE Std 519-2014, New York, <<https://www.kssn.net/for/detail.do?itemNo=F012010003710>>.



**Kyeong-Rae Kang**

Student in the Department of Aerospace & Technology Management, Gyeongsang National University. His research interests include electric energy management.  
E-mail: like1090@naver.com



**Dae-Yul Jeong**

Professor in the Department of Management Information Systems, Gyeongsang National University. His research interests are MIS and system analysis.  
E-mail: dyjeong@gnu.ac.kr



**Su-Jin Kim**

Professor in the School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University. His research interests are CAM and CNC machining.  
E-mail: sujinkim@gnu.ac.kr