

논문 2023-18-26

AC 서보모터 제어 프로그램 구조 설계 및 구현 (Structure Design and Implementation of AC Servo Motor Control Program)

김 경 아, 최 준 영*

(Kyungah Kim, Joon-Young Choi)

Abstract : This study proposes an AC servo motor control program structure and its implementation method to efficiently integrate 13 types of additional compensation algorithms into the basic FOC (field-oriented control) algorithm program. Various compensation algorithms are necessary to enhance the stability and performance of machine tools by compensating for interference from disturbances and vibrations. Each compensation algorithm is implemented as a separate, independent function and called from a switch-case statement in the ISR (interrupt service routine) of the PWM (pulse-width modulation) device. The advantages of this approach include facilitating not only debugging and testing but also reducing the possibility of errors during the program development phase. Thus, it is easy to add and activate each specific compensation algorithm for the program update during the program operation phase. The implemented motor control program was experimented with a single-axis feed shaft testbed driven by a commercial AC servo motor control drive board and a 750 Watts SPMSM (surface-mounted permanent magnet synchronous motor), and the results verified its normal operation and performance improvement.

Keywords : CNC machine, AC servo motor control, Compensation algorithm, Control program management

1. 서 론

공작기계는 넓은 의미에서 금속 또는 비금속 종류의 재료를 성형하는 고정식 동력 구동 기계로, 이는 기계를 만드는 기계라고도 불린다. 다양한 가공 방법들이 존재하는데, 일반적으로 절삭, 압착을 통해 가공하거나 전기, 초음파, 화학 물질 등을 이용해 가공하기도 한다. 현대에 이르러, 서보 제어 공간 메커니즘을 이용하여 공작기계에서 복잡하고 다양한 절삭 경로 설정이 가능하게 되었다.

1938년, Bendix Corporation의 엔지니어였던 J. Parson은 공작기계의 3D 가공 작업을 위한 자동화를 개발하였으며 이후 3년간 MIT에서 이를 개선하였다. 그러나 NC (numerical control)의 보급으로 실제 공작기계 자동화가 시작된 시기는 1970년 및 1980년대이며, 이때부터 마이크로프로세서가 제어 메커니즘의 중요한 역할을 맡게 되며 CNC (computer numerical control)의 개념이 온전히 개발되었다. 이어서 1990년대에는 PC 버스 및 카드 기반의 개방형 아키텍처 (open architecture)를 통해 지능 제조 시스템에 공작기계 통합이 가능하게 되었다.

CNC 개발로 공작기계는 ATC (automated tool change), APC (automated part change) 기능 및 보조 기능들을 추가하여 공정의 완전한 자동화가 가능하게 되었다. 현재 공작

기계는 머시닝 센터가 가장 일반적인 형태로 CNC 밀링 머신을 ATC와 통합하여 드릴링, 밀링, 보링 등의 작업을 수행할 수 있으며, 드럼형 터릿에 다양한 가공 도구를 장착한 CNC 선반 형태인 터닝 센터도 널리 사용되고 있다 [1-3].

공작기계에서 가장 기본적이며 중요한 기능은 절삭 대상과 절삭 도구 사이의 접촉 지점을 정확하게 반복적으로 제어하는 것이며, 이때 절삭 도중 발생하는 힘을 견디면서 진동에도 견딜 수 있는 충분한 정밀도를 유지할 수 있어야 한다. 공작기계에서 정밀도에 영향을 주는 부분인 구동계에서 서보모터 및 드라이브는 지령에 따른 각 이송축의 직선 운동을 제어하며, 스핀들 모터와 드라이브는 스핀들의 회전을 제어한다. 이때 공작기계 이송축의 정밀도 및 신속성에 영향을 미치는 요인으로는 구동계의 기계적인 요소로부터 이송 및 절삭 시 발생하는 진동과 외란이 있으며, 서보 드라이브의 전기회로로부터 발생하는 요인이 있다. 그러므로 외란의 원인을 분석하여 상황에 맞는 알고리즘을 드라이브에 적용함으로써 공작기계의 제어 신뢰성을 높이는 것이 중요하다 [4-8].

이에 따라 다양한 요인들로부터 공작기계의 성능을 향상시키기 위한 다방면의 연구들이 진행되었다. 모터 제어 시 전기 및 기계적 파라미터의 공칭값과 실제값의 차이로 인해 발생하는 문제를 해결하기 위해 MRAS (model reference adaptive system) [9-11], EKF (extended Kalman filter) [12, 13], RLS (recursive least square method) [14-16] 등을 이용한 파라미터 추정 기법들이 제안되었다. 또한 서보 드라이브 회로의 PWM 인버터 작동 시 발생하는 데드타임

*Corresponding Author (jyc@pusan.ac.kr)

Received: Aug. 1, 2023, Revised: Sep. 1, 2023, Accepted: Oct. 8, 2023.

K. Kim: Pusan National University (Ph.D. Student)

J.Y. Choi: Pusan National University (Prof.)

* 본 과제는 부산대학교 기본연구지원사업 (2년)에 의하여 연구되었음.

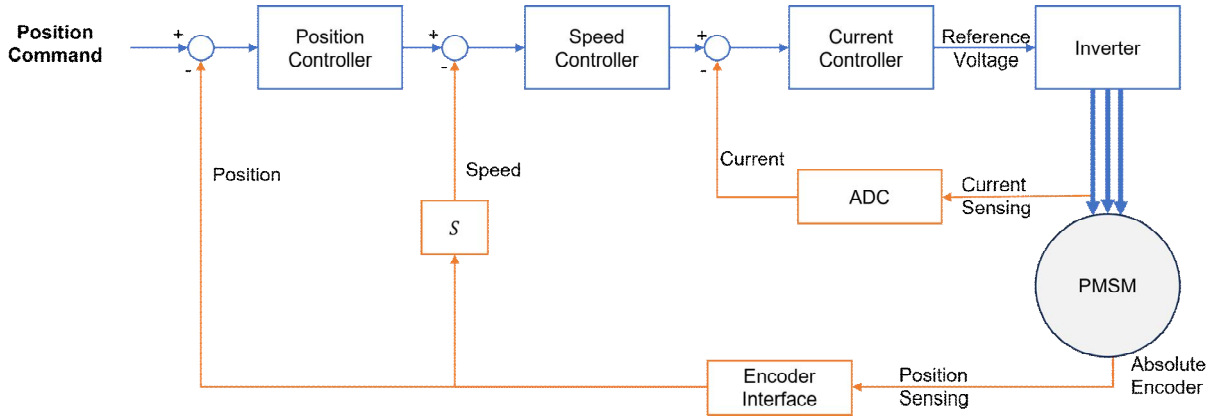


그림 1. FOC 기법의 모터 제어 구조
Fig. 1. Basic structure of FOC technique for PMSM

효과가 성능 저하를 일으키므로, 추가적인 회로를 구성하여 다이오드의 환류 전류 극성을 감지하고 arm short 가능성을 제거하여 데드타임 효과를 줄이는 연구도 진행되었다 [17]. 이외에도 위치 이득 조정 알고리즘 및 미세 가감속 알고리즘 [18], 가속도 피드백 및 입력 성형기법 [19] 등의 다양한 기법들이 제안되었다. 이러한 다양한 기법 및 알고리즘들은 공작기계의 사용 환경이나 외란 요인에 따라서 효과가 상이하 며, 상황에 따라 공작기계 이송축 구동에 적용하게 될 알고리즘 또한 달라지게 된다. 그러므로 다양한 보상 알고리즘을 드라이브에 탑재하고 효율적으로 관리할 수 있는 프로그램 구조를 구현하는 것이 요구되고 있다.

따라서 본 논문에서는 다양한 다수의 모터 보상 제어 알고리즘을 탑재하여 효율적으로 관리 및 운용할 수 있도록 AC 서보모터 제어 프로그램의 구조 설계 및 구현 방법을 제안한다. 제안하는 프로그램 구조는 다수의 보상 제어 알고리즘 개발 단계에서 디버깅 및 실험이 용이하고 오류 발생의 가능성을 낮추는 장점이 있다. 또한 프로그램 운용 단계에서는 특정 알고리즘의 활성화와 추후 새로운 보상 제어 알고리즘 추가가 용이한 장점이 있다. 구현된 모터 제어 프로그램의 실제 동작을 실험하기 위해 상용 AC 서보모터 제어 드라이브 보드와 750W SPMSM으로 구동되는 1축 이송축 테스트베드를 구축하고 구현된 모터 제어 프로그램을 실험하여 정상 동작과 성능 향상을 검증한다.

본 논문의 전체 구성은 다음과 같다. 2장에서는 모터 제어의 기법인 FOC (field-oriented control, 자속 기준 제어) 기반의 프로그램 구조 및 동작 원리에 대해 설명한다. 3장에서는 보상 제어 알고리즘과 이를 탑재한 모터 제어 프로그램의 구조 설계 및 구현 방법을 기술한다. 4장에서는 제안한 프로그램의 동작 실험 및 그 결과를 분석한다. 마지막으로 5장에서 결론을 제시한다.

II. FOC 기법 구현 프로그램

본 논문에서는 AC 서보모터 제어에서 널리 사용되는

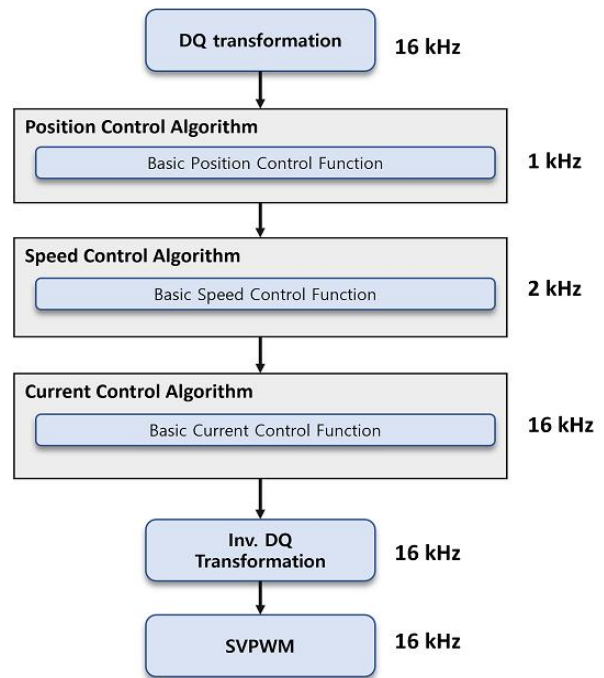


그림 2. FOC 기법의 모터 제어 주기 및 동작 실행 순서
Fig. 2. Motor control cycle and operation flow of FOC technique

FOC 기법을 구현한 프로그램을 기본 제어 프로그램으로 사용한다. AC 서보모터로서 일반적으로 채택되는 PMSM (permanent magnet synchronous motor)을 제어하는 FOC 기법의 구조는 그림 1과 같으며 동작 원리는 다음과 같다.

FOC 기법에서는 측정된 3상 전류를 동기 d-q 좌표계로 변환하여 요구되는 모터 입력 전압값을 계산하며, d-q 좌표계에서 계산된 모터 입력 전압값을 다시 3상 전압값으로 변환하여 인버터에 인가하게 되므로 좌표 변환에 대한 이해가 필요하다 [20]. 3상 교류 전동기의 3상의 변수들은 좌표 변환을 통해 d, q, n축을 가진 직교 좌표계 상의 변수로 변환될 수 있다. 통상 d축은 자속축, q축은 토크축이라고도 불리며 이 둘은 서로 직각을 이룬다. n축은 3차원 공간에서 d축,

q축과 직교하는 축이며 증성축이라고도 불린다. n축은 각상이 균형을 이룬 상태로 3상의 순시합이 0일 때는 무시할 수 있다. 즉, 손실을 무시한 상태에서는 n축은 고려하지 않는다. 따라서 좌표 변환을 통해 3상의 변수들은 d축, q축 2개의 직교 좌표로 이루어진 평면상에 표시할 수 있으며, 이를 통해 전동기의 전기 기계적 에너지 변환 과정을 표현하는 것이 가능하다.

FOC 기법 프로그램에서는 그림 2와 같이 ADC를 통해 PMSM의 3상 전류값을 측정하고, 이를 d-q 변환하여 전류 제어기에 피드백하게 된다. 전류 제어기를 통해 d축 전압 지령 및 q축 전압 지령이 계산되며 이는 다시 3상 전압으로 변환되어 인버터를 통해 전력 변환되어 PMSM에 전압을 인가하게 된다. 본 논문에서 구현된 프로그램에서는 SVPWM (space-vector pulse width modulation) 기법으로 인버터의 스위칭 상태를 제어하여 전압을 변조한다.

본 논문에서는 그림 1의 위치 제어기로 P (proportional, 비례) 제어기, 속도 및 전류 제어기로 PI (proportional-integral, 비례-적분) 제어기를 적용한다. 이때 모터의 위치와 속도 값을 측정하여 제어기로 피드백해야 하는데 BiSS-C (continuous bidirectional serial synchronous) 절대 엔코더 인터페이스를 사용하여 모터 엔코더로부터 수신되는 정보로 모터의 위치 및 속도를 계산하여 속도 및 위

치 제어기에 피드백한다. 그림 1의 각 블록은 모두 각각의 함수들로 구현되며 그 제어 주기와 동작 실행 순서는 그림 2의 흐름도와 같다. 특히 위치, 속도, 전류 제어는 각각 1 kHz (1 ms), 2 kHz (0.5 ms), 16 kHz (62.5 μ s) 제어 주기로 실행되고 d-q 변환, 역 d-q 변환, SVPWM은 16 kHz (62.5 μ s) 주기로 실행된다. 그림 1에 나타나듯이 위치, 속도, 전류 제어기는 직렬 연결 구조 형태로 구성되어 있으며, 이중 가장 내부에 있는 전류 제어기가 가장 빠른 주기로 동작하며, 외부 제어기인 속도 및 위치 제어기는 전류 제어기보다 8배 및 16배 느리게 작동한다. 이렇게 각 제어기마다 동작 주기를 다르게 설정함으로써 각 제어기는 독립적으로 설계될 수 있다 [21].

III. 보상 제어 프로그램

1. 보상 제어 알고리즘

공작기계의 신속성과 정확성은 결과물의 품질과 밀접한 관련이 있으며, 낮은 강성, 절삭 가공 시의 진동 등으로 인한 신뢰성의 저하를 방지할 필요가 있다. 공작기계의 기계적 요소인 구동부의 한계로 인해 발생할 수 있는 기계적 진동의 종류는 횡 진동 (lateral vibration), 축 진동 (axial vibration) 및 비틀림 진동 (torsional vibration)이 있다.

표 1. 보상 제어 알고리즘별 사용 목적 및 작동 원리

Table 1. Purposes and principles of compensation control algorithms

Classification	No.	Control Function	Usage Purpose and Operation Principle
Stop-State Vibration Damping	1	Velocity Loop High Cycle Management	• It calculates the speed controller's proportional control output 2 times faster to damp the stop-state vibrations.
	2	Acceleration Feedback Function	• It reduces the amplitude of vibrations in 50-150 Hz by compensating the motor acceleration to the torque input in the stop-state.
	3	Variable Proportional Gain Function	• It reduces the proportional gain of the speed controller by a certain percentage to damp high-frequency oscillations in the stop-state.
	4	Pulse Suppression Function	• It sets the speed controller's proportional gain to zero to suppress vibrations caused by its proportional output.
	5	Current Loop $\frac{1}{2}$ PI Control Function	• It reduces overshoot during current control transients by simultaneously applying the IP and PI controllers in the current controller.
Machinery Resonance Elimination	6	Resonance Elimination Filter	• It eliminates high-frequency components above 200 Hz by applying a notch filter to the torque command during high-speed traverse.
	7	Disturbance Elimination Filter	• It estimates and compensates the vibrations in the 50-150 Hz range by adding the motor acceleration to the torque command.
	8	Machine Speed Feedback &Vibration Damping Control	• It suppresses torsional vibration by compensating the torque command for the difference between the speed of the motor and the traverse axis during acceleration/deceleration. (requires a traverse shaft positioning device)
	9	Machine Point Control	• It measures the low resonance frequencies with an accelerometer and eliminates them by compensating the torque command using a filter. (requires an accelerometer)
Precise Geometry Machining	10	Feed-Forward Function	• It forward-compensates the input signals of the current and speed controllers by processing the position command from the position controller to compensate for the geometry machining errors due to backlash and viscous friction.
	11	Backlash Acceleration Function	• It reduces the occurrence of the quadrant bulges in circular cuts by increasing the speed command at the motor reversal for a period of time.
	12	Static Friction Compensation Function	• It achieves fast speed response at the beginning of control by increasing speed command for a period of time when the motor starts to rotate from a standstill to reduce speed delay due to static friction.
	13	Torsion Preview Control Function	• It suppresses torsional vibrations by compensating the torque command by measuring the speed difference caused by the torsion and slippage of the motor and the traverse shaft during acceleration/deceleration. (requires a traverse shaft positioning device)

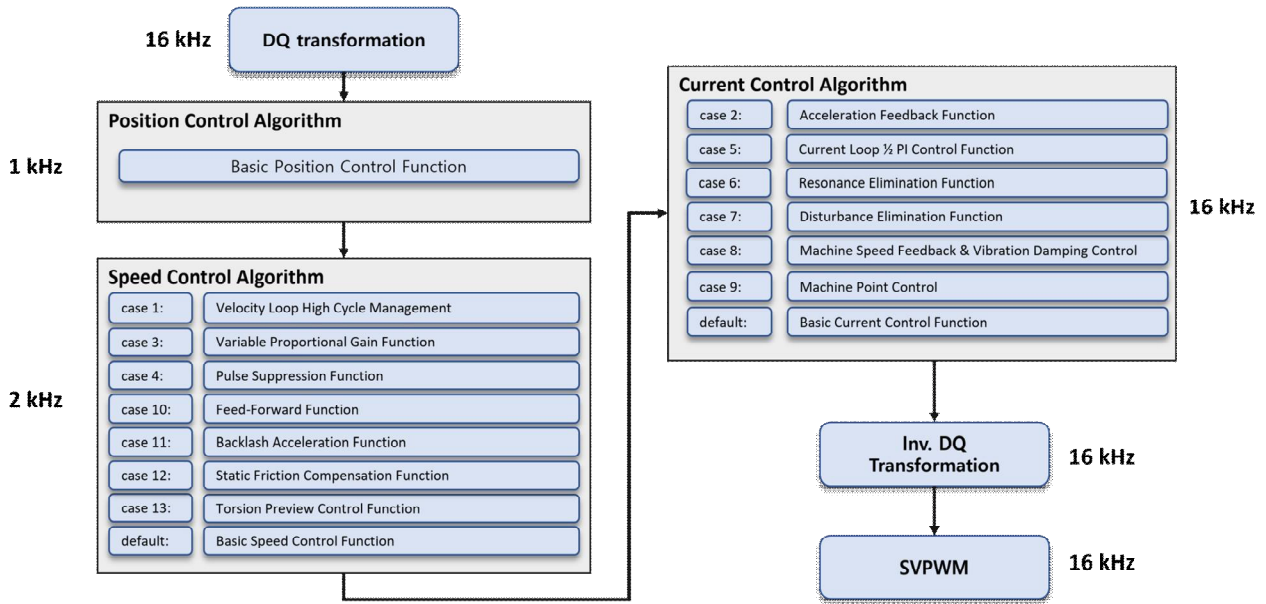


그림 3. 보상 제어 알고리즘을 포함한 모터 제어 프로그램 구조
Fig. 3. Motor control program structure including compensation control algorithms

이들을 제거하는 방법으로 필터 이용 방법, 입력 성형 제어 방법, 상태 변수 측정 및 추정 방법, 현대 제어 기법이 있다. 그중 가장 대표적인 방법은 공작기계 이송축의 진동 주파수를 추정하여 저대역 통과 필터 (low pass filter) 또는 노치 필터 (notch filter)를 속도 제어기에 적용하는 것이다. 이외에도 다양한 기법이 존재하며, 사용 환경이나 기능 저하의 원인에 따라 효과적인 기법이 상이하다. 상황에 따라서는 적절치 않은 기법의 적용으로 인해 공작기계의 성능 저하가 야기되기도 한다. 따라서 공작기계에서는 다수의 보상 제어 알고리즘의 탑재를 통해 다양한 제어 기능을 확보하는 것이 공작기계의 성능 향상에 중요하다.

따라서 본 논문에서는 정지 상태 진동 감쇠 알고리즘 5종, 기계 공명 제거 알고리즘 4종, 정밀 형상 가공 알고리즘 4종으로 구성되는 총 13종의 보상 제어 알고리즘을 설계하고 구현한다. 각 알고리즘의 상세 내용은 표 1의 내용과 같다.

2. 프로그램 구조 설계 및 구현

개발된 13종의 보상 제어 알고리즘을 기존의 FOC 프로그램에 추가하여 구현하는데 오류 발생 가능성을 낮추고 디버깅과 실험을 용이하게 하기 위하여 다음과 같은 프로그램 구조를 설계하고 구현한다.

우선 13종의 보상 제어 알고리즘이 기존 어떤 제어기와 관련된 알고리즘인지 분류하고 제어 주기를 결정한다. 즉 속도 제어기와 관련이 있으면 2 kHz (0.5 ms) 주기로 동작하고 전류 제어기와 관련이 있으면 16 kHz (62.5 μs)로 동작한다. 각 보상 제어 알고리즘의 구현 방식은 기존의 모터 제어 프로그램의 속도 및 전류 제어기 함수에 기능이 추가된 형태로 구현하는 방식으로 각 알고리즘마다 별도의 속도 제어기 함수 및 전류 제어기 함수로 구현된다. 따라서 특정

알고리즘 활성화 시 기존의 모터 제어 프로그램의 속도 및 전류 제어기 함수가 알고리즘이 적용된 새로운 속도 및 전류 제어기 함수로 대체되어 실행된다.

13종의 보상 제어 알고리즘을 프로그램에서 인식하기 위한 인덱스값으로 1부터 13 사이의 정수로 할당하였으며, 알고리즘 선택 변수인 function_mode에 해당하는 알고리즘 인덱스값을 저장하면 이에 상응하는 보상 제어 알고리즘을 포함한 속도 및 전류 제어기 함수로 대체되어 실행된다. 이때 특정 보상 알고리즘 제어기의 선택은 16 kHz 주기로 동작하는 PWM ISR에서 function_mode 변수를 인덱스로 하는 switch-case 문으로 구현한다. switch-case 문을 사용함으로써 드라이브에 탑재된 다수의 알고리즘들 중 사용하고자 하는 특정 알고리즘의 활성화와 추후 새로운 알고리즘의 추가가 용이한 장점이 있다.

기존 FOC 기법의 속도 및 전류 제어 함수와 새롭게 추가된 13종의 보상 제어 알고리즘 구현 함수를 포함한 총 14가지의 인덱스가 있는 switch-case 문의 구조와 각 함수의 동작 주기는 그림 3과 같다.

IV. 실험 및 결과

1. 실험 환경

실험을 위한 하드웨어의 구성 요소는 그림 4와 같다. 상용 AC 서보모터 제어 드라이브로 TI TMS320F28388D 컨트롤 카드와 IDDK 보드를 사용한다. 920 mm 길이의 이송거리를 가진 1축 이송축은 LM (linear motion) 가이드와 볼 스크류로 구성되며, Parker사의 750W SPMSM PM-FCL08AMK에 의해 구동된다. 프로그램 구현을 위한 소프트웨어 개발환경

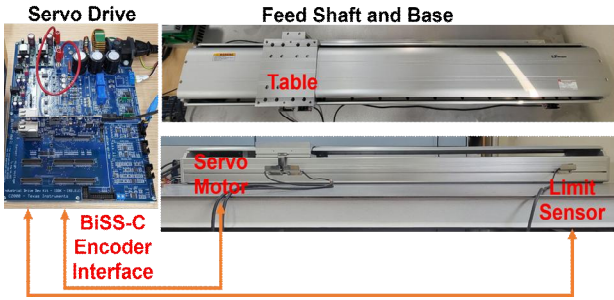


그림 4. 실험 환경
Fig. 4. Experimental environment

으로는 TI사에서 제공하는 CCS (code composer studio)를 사용하였다.

실험에서는 구현된 보상 제어 알고리즘을 적용하기 전과 후의 이송축의 응답 특성 및 모터 가속도 FFT (fast Fourier transform) 값을 계산하고 공명 주파수 성분 크기의 감소 여부를 확인하여 제안된 보상 제어 알고리즘 프로그램의 정상 동작과 성능 개선 여부를 검증한다.

2. 실험 결과

본 논문에서 제안된 프로그램에 탑재된 알고리즘은 총 13종이며, 이들은 그 적용 목적에 따라 정지 상태 진동 감쇠, 기계 공명 제거, 정밀 형상 가공 알고리즘으로 나뉜다. 정지 상태 진동 감쇠 알고리즘은 공작기계가 가공 중이며 이송축이 정지 상태일 때 백래시로 인한 부하 관성 감소나 제어 루프의 비례 이득이 너무 큰 경우 발생하는 진동을 방지하기 위한 기능들로 구성되어 있다. 따라서 정지 상태에서 이송축의 응답 특성을 분석하고, 모터 가속도의 FFT 값을 계산하여 공명 주파수 성분 크기 감소 여부를 확인한다. 정지

표 2. 정지 상태 진동 감쇠 알고리즘 적용 전과 후의 모터 가속도 FFT를 통한 공진 주파수 성분의 변화
Table 2. Changes in resonant frequency components through FFT of motor acceleration before and after applying the stop-state vibration damping algorithms

Control Algorithm	Resonance Freq. (Hz)	Amplitude in Freq.	
		Before	After
Velocity Loop High Cycle Management	120	11.1149	10.3726
	290	2.1676	1.5583
Acceleration Feedback Function	120	11.1149	10.0940
	290	2.1676	2.8794
Variable Proportional Gain Function	120	9.9881	8.2393
	290	2.9038	2.2611
Pulse Suppression Function	120	9.9881	8.9974
	290	2.9038	3.4916
Current Loop 1/2 PI Control Function	120	9.6155	9.5716
	290	2.9988	1.6200

상태 진동 감쇠에 해당하는 5종의 보상 제어 알고리즘의 실험 결과는 표 2와 같으며, 대체로 기능 적용 시 공명 주파수 성분 크기가 감소하는 것으로 나타났다.

기계 공명 제거 알고리즘은 4종의 보상 제어 알고리즘으로 구성되어 있으며, 공작기계가 가공 중일 때 이송축과 스피들로부터 발생하는 기계적 공진 및 공명을 보상하기 위한 목적으로 사용된다. 발생 원인과 발생 주파수 대역에 따라 적절한 알고리즘을 선택하여 사용이 가능하다. 표 3을 통해 알고리즘 적용 시 공명 주파수 성분 크기가 감소된 것으로 나타났다.

마지막으로 정밀 형상 가공 알고리즘은 4종의 보상 제어 알고리즘으로 구성되며, 가공 중 백래시 및 점성 마찰로 인한 형상 오차를 보상하는 목적으로 사용된다. 따라서 실험에서는 위치 오차 RMS 또는 속도 오차 RMS 값을 이용하여 알고리즘 적용 전과 후의 성능을 가능하다. 실험 결과에 해당하는 표 4에 따르면, 알고리즘 적용 시 위치 오차 RMS 값이 적용

표 3. 기계 공명 제거 알고리즘 적용 전과 후의 모터 가속도 FFT를 통한 공진 주파수 성분의 변화
Table 3. Changes in resonant frequency components through FFT of motor acceleration before and after applying the mechanical resonance elimination algorithms

Control Algorithm	Resonance Freq. (Hz)	Amplitude in Freq.	
		Before	After
Resonance Elimination Filter	33	47.6883	48.3623
	200	61.5334	59.7426
	290	75.4654	55.4379
Disturbance Elimination Filter	80	44.2836	43.4697
	290	35.6157	32.5885
Machine Speed Feedback & Vibration Damping Control	20	53.3648	52.6068
	120	48.3201	49.5086
Machine Point Control	20	53.9478	52.1037
	120	42.4909	39.0707
	290	15.6774	12.2053

표 4. 정밀 형상 가공 알고리즘 적용 전과 후의 위치 및 속도 오차 RMS 값의 변화

Table 4. Changes in RMS position errors and speed errors before and after applying the precision geometry machining algorithms

Control Algorithm	Comparison	Before	After
Feed-Forward Function	Position Error RMS (mm)	18.6170	9.9350
Backlash Acceleration Function		15.6610	14.1610
Static Friction Compensation Function		0.1148	0.1147
Torsion Preview Control Function	Speed Error RMS (rad/s)	0.0434	0.0428

전보다 작게 나타났다. 또한 Torsion Preview Function 적용 후에는 속도 오차 RMS가 감소한 것으로 확인되었다.

표 2, 표 3, 표 4의 결과로부터 13종의 보상 제어 알고리즘을 적용하였을 때 적용 전보다 성능이 개선되는 것을 확인할 수 있고 이는 본 논문에서 제안된 프로그램 관리 및 운용 방법의 정상 동작과 효과를 검증한다.

V. 결론

본 논문에서는 다수의 모터 보상 제어 알고리즘을 기존 FOC 프로그램에 통합하여 전체 제어 프로그램을 효율적으로 관리 및 운용할 수 있도록 AC 모터 드라이브 제어 프로그램의 구조 설계 및 구현 방법을 제안하였다. 각 보상 제어 알고리즘은 별도의 독립된 함수로 구현되었으며, PWM ISR에 switch-case문을 적용하여 특정 보상 제어 알고리즘이 function_mode 값의 설정으로 실행될 수 있도록 설계되었다. 이러한 프로그램의 구조는 다수의 보상 제어 알고리즘 개발 단계에서 디버깅 및 실험이 용이하고 오류 발생의 가능성을 낮추는 장점이 있다. 또한 프로그램 운용 단계에서는 특정 알고리즘의 활성화와 추후 새로운 보상 제어 알고리즘 추가가 용이한 장점이 있다.

구현된 모터 제어 프로그램의 실제 동작을 실험하기 위해 상용 AC 서보모터 제어 드라이브 보드와 750W SPMSM으로 구동되는 1축 이송축 테스트베드를 구축하였으며, 구현된 모터 제어 프로그램을 실험하여 정상 동작과 성능 향상을 검증하였다. 향후에 공작기계의 진동과 외란에 의한 영향을 저감하기 위한 다양한 보상 제어 알고리즘들을 개발하고 시험하는 데에 제안된 프로그램의 구조가 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

References

- [1] L. N. Lopez de Lacalle, A. Lamikiz, "Machine Tools for High Performance Machining," Springer, 2009.
- [2] S. H. Suh, S. K. Kang, I. Stroud, "Theory and Design of CNC Systems," Springer, 2008.
- [3] H. W. Oh, "A Study on Servo Motor Control in Multi Pallet System," IEMEK Journal of Embedded Systems and Applications, Vol. 14, No. 6, pp. 339-346, 2019 (in Korean).
- [4] J. Fleischer, B. Denkena, B. Winfough, M. Mori, "Workpiece and Tool Handling in Metal Cutting Machines," CIRP Annals, Vol. 55, No. 2, pp. 817-839, 2006.
- [5] K. Cheng, "Machining Dynamics," Springer, 2009.
- [6] I. U. Eun, H. S. Chee, J. W. Lee, "The Technical Trend and Future Development Direction of Machine Tools Feed Drive System by Patent Mapping," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 29, No. 5, pp. 510-515, 2012 (in Korean).
- [7] E. C. Jeon, Y. Hirota, M. Tsutsumi, S. Namgung, "An Improvement of Positioning Accuracy for CNC Machine Tools," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 11, No. 6, pp. 5-11, 1994 (in Korean).
- [8] B. Yang, G. Zhang, Y. Ran, H. Yu, "Kinematic Modeling and Machining Precision Analysis of Multi-Axis CNC Machine Tools Based on Screw Theory," Mechanism and Machine Theory, Vol. 140, pp. 538-552, 2019.
- [9] B. Nahid-Mobarakeh, F. Meibody-Tabar, F-M. Sargos, "Mechanical Sensorless Control of PMSM with Online Estimation of Stator Resistance," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 40, No. 2, pp. 457-471, 2004.
- [10] T. H. Nguyen, D. C. Lee, "Deterioration Monitoring of DC-link Capacitors in AC Machine Drives by Current Injection," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 30, No. 3, pp. 1126-1130, 2015.
- [11] W. He, M. M. Namazi, T. Li, R. Ortega, "A State Observer for Sensorless Control of Power Converters with Unknown Load Conductance," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 37, No. 8, pp. 9187-9199, 2022.
- [12] Y. Shi, K. Sun, L. Huang, Y. Li, "Online Identification of Permanent Magnet Flux Based on Extended Kalman Filter for IPMSM Drive with Position Sensorless Control," IEEE Transactions on Industrial Electronics Vol. 59, No. 11, pp. 4169-4178, 2011.
- [13] Z. Q. Zhu, D. Liang, K. Liu, "Online Parameter Estimation for Permanent Magnet Synchronous Machines: An Overview," IEEE Access, Vol. 9, pp. 59059-59084, 2021.
- [14] Y. Inoue, Y. Kawaguchi, S. Morimoto, M. Sanada, "Performance Improvement of Sensorless IPMSM Drives in a Low-Speed Region Using Online Parameter Identification," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 47, No. 2, pp. 798-804, 2010.
- [15] W. Deng, C. Xia, Y. Yan, Q. Geng, T. Shi, "Online Multiparameter Identification of Surface-Mounted PMSM Considering Inverter Disturbance Voltage," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 32, No. 1, pp. 202-212, 2017.
- [16] C. Lian, F. Xiao, J. Liu, S. Gao, "Parameter and VSI Nonlinearity Hybrid Estimation for PMSM Drives Based on Recursive Least Square," IEEE Transactions on Transportation Electrification, Vol. 32, No. 1, pp. 202-212, 2022.
- [17] K. M. Cho, W. S. Oh, Y. T. Kim, H. J. Kim, "A New Switching Strategy for Pulse Width Modulation (PWM) Power Converters," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 54, No. 1, pp. 330-337, 2007.
- [18] J. S. Kim, S. M. Park, J. Y. Choi, "High-Speed and Precise Positioning Control Algorithm for CNC Machine Tool," Conference on Information and Control Systems (CICS 2021), The Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 157-158, 2021 (in Korean).
- [19] B. S. Kim, "Input Shaping for Servo Control of Machine Tools," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 28, No. 9, pp. 1011-1017, 2011 (in Korean).
- [20] K. H. Nam, "AC Motor Control and Electrical Vehicle

Applications,” CRC press, 2019.

- [21] M. A. Valenzuela, R. D. Lorenz, “Startup and Commissioning Procedures for Electronically

Line-shafted Paper Machine Drives,” IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 38, No. 4, pp. 966-973, 2002.

Kyungah Kim (김경아)



2014 Electronics Engineering from Silla University (B.S.)
2020 Electronics Engineering from Pukyong National University (M.S.)
2020~Electrical and Electronics Engineering from Pusan National University (Ph.D. Candidate)

Field of Interests: Embedded system and control system

Email: flyingcat901@pusan.ac.kr

Joon-Young Choi (최준영)



1994 Electronics and Electric Engineering from Pohang University of Science and Technology (B.S.)
1996 Electronics and Electric Engineering from Pohang University of Science and Technology (M.S.)

2002 Electronics and Electric Engineering from Pohang University of Science and Technology (Ph.D.)

2005~Department of Electronics Engineering at Pusan National University, Busan, Korea (Prof.)

Field of Interests: Embedded system and control system

Email: jyc@pusan.ac.kr