

이중 모터 구동 전기기계 브레이크 시스템을 위한

새로운 동기 제어 구조 기반 강인 클램핑력 제어

정 인 수¹⁾ · 황 상 우²⁾ · 남 강 현^{*1)}

영남대학교 기계공학과¹⁾ · 현대자동차²⁾

Robust Clamping Force Control using New Synchronous Control Structure for Dual-Motor Electromechanical Brake System

Insu Chung¹⁾ · Sangwoo Hwang²⁾ · Kanghyun Nam^{*1)}

Yeungnam University¹⁾, Hyundai Motor Company²⁾

Key words : Clamping Force Estimation(클램핑력 추정), Disturbance Observer(외란 관측기), Electromechanical Brake(전기기계 브레이크), Synchronous Control(동기 제어)

교신저자, E-mail: khnam@yu.ac.kr

최근 전기차(EV)의 보급이 확대되면서, 차량 내 부품들의 전동화가 빠른 속도로 진행되고 있다. 이러한 전동화 부품들은 안전과 직결되는 제동 장치에 대한 엄격한 안전 규제와 이중화(Redundancy)에 대한 요구가 강화되는 추세다. 이런 전동화 부품들은 기존 기계식 대비 설계 자유도, 빠른 응답성, 정밀 제어, 효율 개선 등의 이점을 주지만 전기·전자 부품에 대한 의존도가 높아 고장에 대한 안전 문제가 부각되고 있다. 특히 제동 시스템의 고장은 운전자가 차량을 통제할 수 없게 만들어 치명적인 사고로 이어질 수 있기 때문에 엄격한 안전 규제(ISO 26262)와 이중화(Redundancy)가 요구되고 있다.

단일 모터 EMB 시스템은 모터 간 동기화가 필요 없기 때문에, 기존 연구에서는 PID, 모델 예측 제어(MPC), 그리고 외란 관측기(DOB)와 같은 기법을 활용하여 단일 모터의 정밀한 클램핑력 제어에 주로 초점을 맞추어 왔다. 그러나 이중 모터 EMB 시스템은 기계적으로 결합된 두 모터가 통합된 동작을 생성해야 하므로, 단일 모터 제어 전략만으로는 제어 성능과 시스템 안정성을 모두 확보하기가 어렵다. 특히 두 모터가 서로 다른 응답 특성을 보이거나 백래시로 인해 동작 불일치가 발생하면, 기계적으로 결합된 부품에 비대칭적인 힘이 작용하여 동기화에 문제를 일으킬 수 있다. 기존의 동기 제어 방식(Master-Slave, Cross-Coupled, Virtual Shaft 등)은 전통적으로 액추에이터의 위치 차이를 최소화하는 데 초점을 맞추어 왔으며, 이중 모터 EMB 시스템 고유의 토크 불일치 및 공진 문제를 직접적으로 해결하도록 설계된 것은 아니다. 특정 제어 알고리즘이나 차이 채널 보상과 같은 추가적인 보상 기법이 제안되긴 했지만, 대개 핵심 제어 구조와는 독립적으로 혹은 개별 모터 단에서만 구현되어 복잡성이 증가하는 단점을 갖고 있다.

이러한 한계를 극복하기 위해, 본 논문에서는 모터 입력 토크와 센서 측정값의 평균과 차이를 모두 활용하여 동기화된 동작을 생성하는 새로운 동기 제어 구조를 제안한다. 구체적으로, 평균 채널은 시스템의 전체 목표 동작을 추종하기 위한 제어 신호를 생성하고, 차이 채널은 두 모터 간의 상대적 오차(예: 위치, 토크, 속도 차이)를 감지하고 보상한다. 공통 동작(평균 채널)과 상대적 오차(차이 채널)를 분리함으로써, 제안된 방법은 기계적 연결 부에서 발생하는 결합 요소에 의한 공진을 구조적으로 완화하고 보다 안정적인 동기 성능을 구현한다. 또한 시스템 전반에서 외란과 모델링 불확실성에 대한 견고성을 확보하기 위해, 평균 채널, 차이 채널, 그리고 힘 제어기에 외란 관측기가 적용된다. 제안된 방법의 유효성은 테스트 베드에서의 실험을 통해 검증되었다. 기존 제어 전략과 비교했을 때, 실험 결과는 제안된 제어 방식이 동기화 정확도를 향상시키고, 제동 성능을 향상시키는데 유효한 방안을 확인하였다.

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 2022R1C1C1011785).

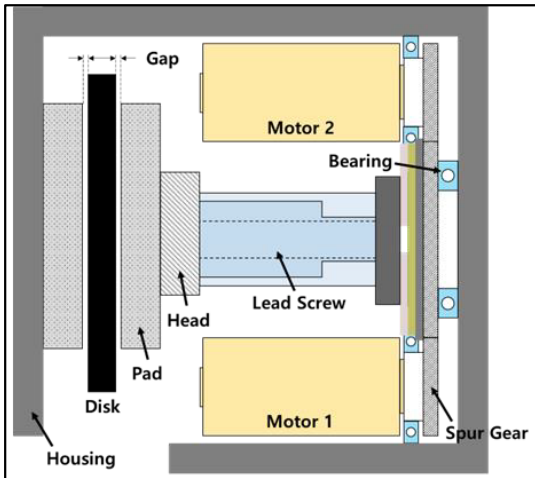


Photo. 1 Schematic diagram of the EMB system

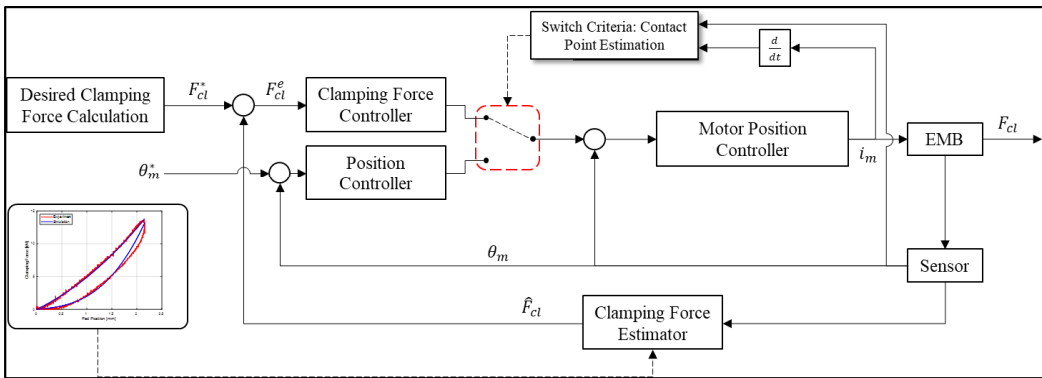


Photo. 2 Block diagram of the EMB control

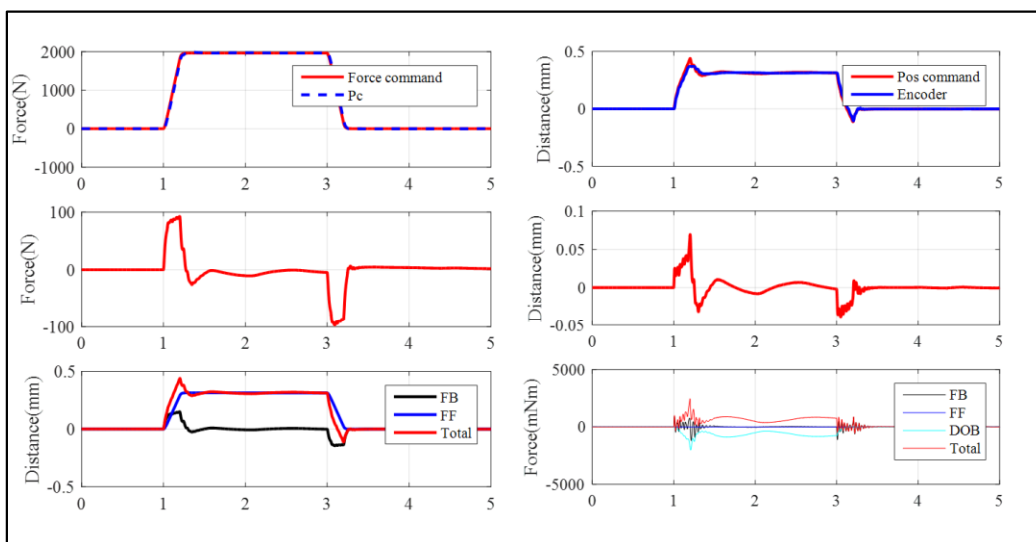


Photo. 3 Experiment Result