

외란 관측기 기반의 BLAC 전동기로 구동하는 레일 트래クション 시스템의 위치 제어

조기완¹, 이동희[†]

Position Control Scheme of Rail Traction System Based on the BLAC Motor With Disturbance Observer

Kiwan Cho¹ and Dong-Hee Lee[†]

Abstract

This study presents an overhang-type rail traction system using dual brushless AC (BLAC) motors with hall sensors. For an accurate position and moving length control of the designed rail traction system, instantaneous position controller using speed reference model and modified disturbance observer for BLAC motor with hall sensor are proposed. The presented speed reference model is designed to satisfy the required performance of 200 mm/s with proper acceleration and deceleration slopes to reduce mechanical vibration. Through the instantaneous speed reference model, instantaneous position and speed errors can be compensated together. Furthermore, the modified disturbance observer for BLAC motors with low-resolution hall sensors can improve the torque and speed control performance. The proposed disturbance observer is based on an actual motor speed. However, the feedback speed information of the hall sensor is not enough for use in the low-speed region. The practical adopted disturbance observer uses an activation speed band to the actual torque controller of the designed rail traction system. The proposed position control scheme is verified by the MATLAB - Simulink model and a practical manufactured traction system. In the computer simulation and experiments, the proposed position control scheme shows advanced control performance.

Key words: Rail traction system, BLAC (Brushless AC) motor, Hall sensor position, Disturbance observer

1. 서 론

레일 트래クション 시스템은 반도체 반송장비, 무인 물류 시스템, 야적장 및 무인 설비 등에서 다양한 형태로 활용되고 있다. 특히, 최근에는 각종 지상 및 지하의 무인 전력 설비에서, 모니터링 및 감시와 침입자 감시를 위해 다양한 레일 트래クション 시스템이 설계되어 적용되고 있다^{[1],[2]}. 일반 주행용 로봇이 적용되기 어려운 환경에서 간단한 주행경로를 레일로 처리하여 프로그래밍된 위치

로의 이동 및 모니터링이 가능하도록 해주는 시스템이 많이 적용되고 있다^{[3]-[5]}.

고성능 반도체 반송설비에서는 초정밀 위치제어를 위해서 고성능 PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor)과 고정밀 엔코더 및 레졸버 기반의 트래クション 시스템으로 설계하지만, 일반적인 물류 및 감시와 모니터링 시스템에서는 비교적 설계가 용이하고 가격 경쟁력이 있는 홀센서 기반으로 동작하는 BLDC(Brushless DC) 전동기 또는 BLAC(Brushless AC) 전동기로 트래クション 시스템을 구성하게 된다. BLDC 전동기와 BLAC 전동기는 홀센서 기반으로 위치 및 속도를 검출하여 제어하지만, 역기전력 형상에 따라, 토크 리플을 저감하기 위해서 각 역기전력 형상에 적합한 2상 또는 3상 스위칭 방식으로 전류를 제어한다.

레일 트래クション 시스템에서 주행 경로가 되는 레일은 사용 환경에 따라 곡면 및 경사도가 있고, 이 레일을 따라서 주행 장치인 트래クション 전동기를 제어하여 롤러가 레일

Paper number: TKPE-2021-26-2-8

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: leedh@ks.ac.kr, Dept. of Mechatronics Engineering, Kyungshung University, Korea
Tel: +82-51-663-4693 Fax: +82-51-626-4773

¹ Dept. of Mechatronics Engineering, Kyungshung University, Korea

Manuscript received Nov. 21, 2020; revised Jan. 16, 2021; accepted Jan. 17, 2021

— 본 논문은 2020년 전력전자학술대회 우수논문상 수상논문임

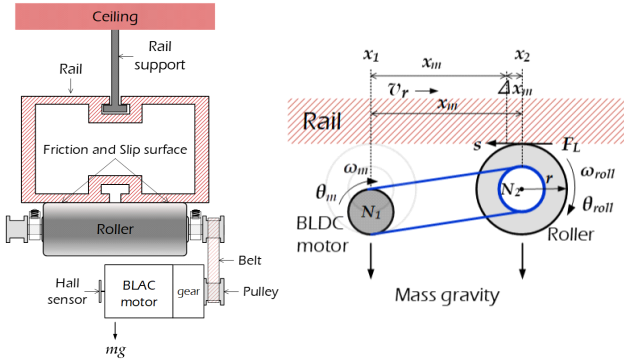


Fig. 1. Conventional rail traction system.

을 따라 주행하도록 설계된다. 일반적으로 레일의 설치하는 건축물의 벽면 또는 천장 부분에 설치가 되므로 트랙션 전동기의 배치 및 트랙션 구조의 설계에 제약이 많다. 천장을 통해서 레일을 설치하는 경우에, 구동 롤러는 레일의 아랫면에 설치되어 구동되는 경우가 일반적이다. 이러한 경우 하단면의 롤러와 레일 표면 사이에 마찰력이 일정하지 않아 슬립현상이 발생하게 된다. 일반적인 레일 트랙션 시스템에서, 레일에 절대 위치를 검출할 수 있는 별도의 센서를 사용하지 않고, 트랙션 전동기의 위치를 통해서 레일상에서의 이동 위치를 제어하게 된다. 따라서, 슬립현상으로 인하여 전동기의 위치와 실제 레일의 이동 위치가 차이가 발생하게 된다. 마찰력을 조절하는 장치를 일반적으로 설치하여 마찰력을 조절하지만, 트랙션 장치의 무게하중으로 인하여 텐션이 지속적으로 가변하게 되므로 일정한 마찰력을 유지하기는 매우 어렵다.

레일과 롤러 사이에 일정한 마찰력을 유지하기 위해서는 트랙션 시스템의 무게 하중이 레일의 상단에서 발생하는 것이 유리하다. 하지만, 레일 중앙에 설치를 위한 지지대로 인하여 단일 롤러 구조로는 설계가 매우 어렵다. 이를 해결하기 위해서 2개의 롤러가 설치 구조물을 피해서 설계되는 형상이 필요하다.

본 논문에서는 상단부 레일에서 2개의 기어를 가지는 BLAC 전동기와 롤러가 오버행 타입으로 접촉될 수 있는 구조의 레일 트랙션 시스템을 설계하였다. 또한, 시스템에서 정밀한 위치 제어가 가능한 위치 제어 시스템을 제안하고 있다. 제안하는 위치제어 방식은 정해진 위치까지 요구되는 이동속도를 만족하며, 진동을 억제하기 위한 가속 및 감속구간을 가지는 실시간 속도 모델 기반의 위치제어 방식이다. 실시간 이송거리 지령값은 속도 모델로부터 연산하여, 실시간 속도지령과 실시간 이송거리 지령으로 트랙션 전동기의 속도와 위치를 제어하게 된다. 특히 레일 주행 상태에서 레일과 시스템의 마찰과 운전 중 외란 부하를 관측하는 외란 부하 관측기로부터 토크 지령을 보정함으로써, 제어 성능을 향상시키고 있다. 적용된 외란 부하 관측기는 전동기의 속도 정보를 기반으로 외란 부하를 관측하고 있는데, 본 논문

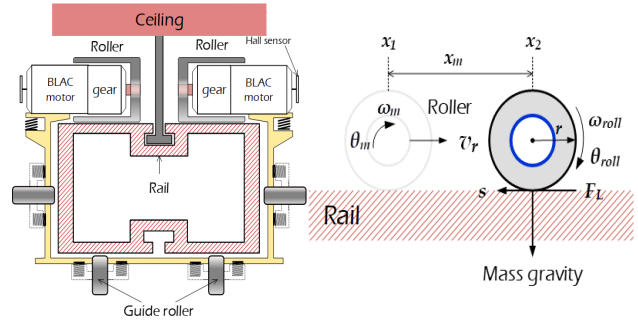


Fig. 2. Proposed rail traction system.

에 적용된 홀센서 기반의 BLAC 전동기의 경우에는 저속 구간에서 속도 정보 업데이트가 지연되고 이로 인하여 외란관측기의 관측성능이 크게 저하되어 오히려 외란을 가중시키게 된다. 따라서 적용된 외란 관측기의 경우에는 저속영역에서 데드존을 구성하여 특정속도 영역에서 외란관측이 전동기의 토크 제어에 반영되고, 홀센서 속도 검출이 지연되는 저속의 영역에서는 기본 실시간 속도 및 이송거리 제어를 통해서 운전되는 방식을 제안하였다.

제안된 방식은 실제 제작된 트랙션 시스템에서 무부하와 10N의 외란 부하에 대한 다양한 실험을 통해서 그 성능을 검증하였다.

2. 레일 트랙션 시스템의 구성 및 수학 모델

2.1 기존의 레일 트랙션 시스템의 구조 및 모델

그림 1은 일반적인 레일 트랙션 장치의 구조와 등가 모델 및 주행에 따른 슬립현상에 따른 이동 거리의 오차 현상을 나타내고 있다^[6].

그림 1에서 보이는 바와 같이, 기존 레일 트랙션 장치는 구동 롤러가 레일의 하단부에 설치되어, 트랙션 시스템의 무게 하중이 롤러와 레일 표면의 갭과 마찰력을 변동시키는 원인이 되고 있으며, 이로 인하여 전동기의 실제 운전 속도 및 위치와 실제 레일 상에서 주행하는 속도 및 위치가 차이가 나게 되는 원인이 되고 있다.

그림 1에서 롤러에 의해 실제 이동 위치는 x_1 에서 x_2 위치까지 x_m 의 거리만큼 이동하도록 전동기가 제어되어 롤러를 회전시키고 있다. 하지만 실제 이송 거리는 롤러와 레일 표면의 슬립 s 에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$x_m = r \cdot \omega_{roller} \cdot (1 - s) \quad (1)$$

단, r 은 롤러의 회전 반경이다. 즉, 실제 이동거리는 롤러와 레일 표면의 마찰에 의해 오차를 가지게 된다.

이러한 마찰력의 변동을 억제하기 위해서 레일 트랙션 시스템에는 텐션을 조절하는 장치를 설치하고 있지만, 마찰력의 변동은 실시간으로 발생하고, 레일의 기울기

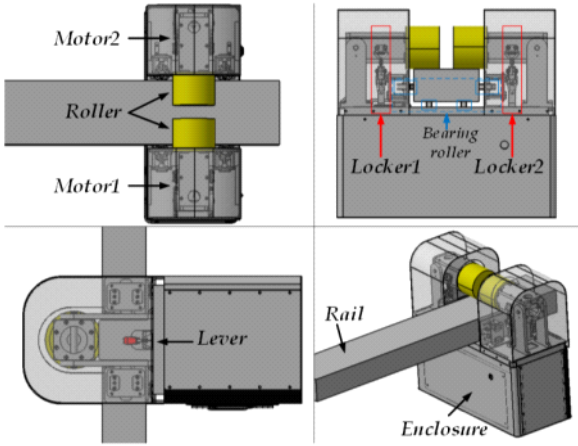


Fig. 3. 3-D model of the proposed rail traction system.

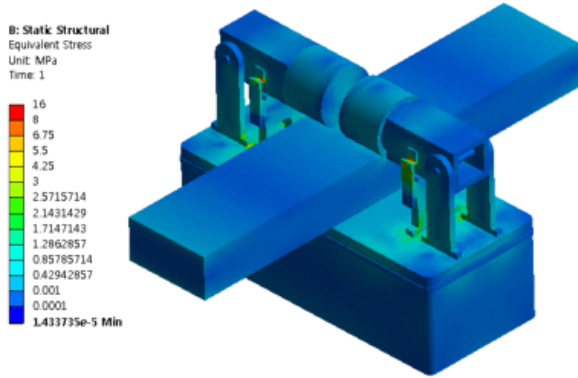


Fig. 4. Mechanical stress of the designed system.

또는 곡면과 레일 트랙션 시스템의 하중 부하가 변동하는 경우에 이러한 현상은 더욱 커지게 된다.

2.2 제안된 레일 트랙션 시스템의 구조 및 모델

그림 2는 본 논문에서 제안하는 오버행 타입의 듀얼 BLAC 전동기를 적용한 레일 트랙션 시스템과 이에 대한 등가 모델을 나타내고 있다. 그림 2에서 제안된 레일 트랙션 시스템의 무게하중은 상단부의 롤러에서 하단부의 레일 표면에 가해지므로, 일정한 마찰력의 유지가 용이하고 이로 인한 슬립효과가 크게 감소하게 되는 장점이 있다. 특히, 부하가 변동하는 경우에도 무게 하중이 오히려 마찰력을 증가시켜, 부하는 증가하지만 슬립현상이 감소하게 되는 특징이 있다. 하지만, 두 전동기의 제어 성능의 차이로 충돌 및 부가적인 부하변동을 발생시킬 수 있으므로, 두 전동기의 병렬 제어의 정밀도가 중요하게 된다.

그림 3과 4는 본 논문에서 설계된 레일 트랙션 시스템의 3-D 모델 및 FEM 해석 결과를 나타내고 있다. 기존의 레일 트랙션 시스템의 문제점들을 보완한 제안된 시스템의 근거를 바탕으로 그림 3과 같이 시스템의 3-D 모델링을 진행하였으며, 해당 모델의 적합성을 판단하기 위해 FEM 해석을 진행하였다. 동체 상판에 20kg의 하중

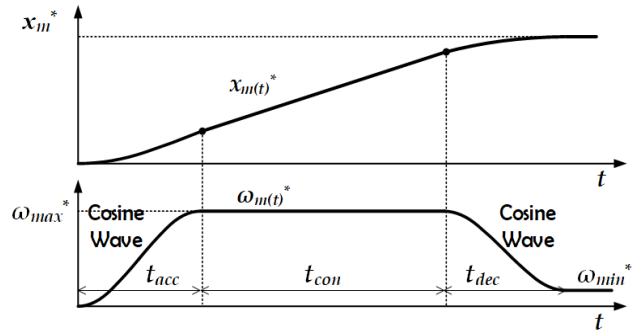


Fig. 5. Proposed speed reference model with cosine acceleration.

을 가하였을 때 최대 응력은 16Mpa이며 이는 안전계수 17에 해당된다.

3. 제안된 위치 제어기

본 논문에서 설계된 트랙션 시스템은 홀센서를 이용한 2개의 BLAC 전동기로 평균 이송속도 200mm/s를 만족하는 실시간 지령속도 모델을 기반으로 정밀 위치 제어 시스템의 순시 위치 제어를 하게 된다. 두 전동기의 위치 및 밸런스 오차를 보상하는 위치 제어기가 제안되었으며, 또한 장애물이나 슬립에 의한 외란 부하에 대하여 외란 관측기를 통해서 정밀 제어 성능을 개선하고 있다.

3.1 순시 운전속도 및 이송 위치 제어 모델

그림 5는 본 논문에서 제안하는 순시 운전속도 및 이송위치 제어 모델인 코사인 가감속 패턴을 나타내고 있다. 그림 5에서 속도 지령 모델은 정해진 이송거리 지령에 따라, 요구하는 평균 이송속도 200mm/s를 만족하며, 급격한 속도 변동으로 인한 레일 트랙션 시스템의 진동을 억제하기 위한 가속구간 t_{acc} 및 감속 구간 t_{dec} 를 가지도록 설계하였으며, 순시 속도 지령 $\omega_m(t)^*$ 의 적분을 통해 순시 이송위치 지령 $x_m(t)^*$ 를 연산하여, 매 샘플링 구간에서 순시 이송위치 지령에 대한 오차로 위치 제어를 수행하게 된다. 이러한 순시 위치지령에 따른 위치 제어 방식은 최종 위치에 대한 위치제어 방식에 비해, 낮은 순시오차로 높은 제어이득을 구현할 수 있다. 제안된 방식에서 각 구간에 해당되는 순시 이송속도 지령 및 순시 이동 위치의 지령은 다음과 같다.

$$\omega_m(t)^* = \frac{\omega_{max}}{2} \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{\pi}{t_{acc}} \cdot t\right)\right) \text{ when, } t \leq t_{acc} \quad (2)$$

$$\omega_m(t)^* = \omega_{max}^* \text{ when, } t \leq (t_{acc} + t_{con}) \quad (3)$$

$$\omega_m(t)^* = \frac{\omega_{max}}{2} \cdot \left(1 + \cos\left(\frac{\pi}{t_{dec}} \cdot (t - t_{acc} - t_{con})\right)\right) \quad (4)$$

$$\text{when, } t \geq (t_{acc} + t_{con})$$

$$x_m(t)^* = r \cdot N_g^{-1} \cdot \int \omega_m(t)^* \cdot dt \quad (5)$$

단, r 은 물리의 반경이며, N_g 는 기어비를 나타내고 있다. 제안된 방식에서는 위치 제어를 위한 속도 지령은 가감속 패턴을 가지고 있는 순시 지령속도와 순시 지령위치와 실제 위치와의 오차로 최종 속도제어 지령을 다음과 같이 결정하게 된다.

$$\omega_m^* = \omega_{m(t)}^* + G_p \cdot (x_m(t)^* - x_m) \quad (6)$$

단, G_p 는 위치 제어기 비례이득을 나타내고 있으며, x_m 은 BLAC 전동기의 구동에 따른 홀센서 펄스 신호의 누적 카운터 값에 의한 이동 위치로 환산된 값이다.

3.2 홀센서 기반 BLAC 전동기 외란 관측기의 설계

제안된 위치제어방식에서 레일 트랙션 시스템에 인가되는 외란 부하에 대해서 급격한 속도 변동이 생기게 되면 슬립 및 오차가 증가하는 현상이 발생한다. 따라서 부하의 급격한 변동에 대한 강인한 제어기의 설계가 필수적이다. 그림 6은 본 논문에서 제안하는 홀 센서 기반의 BLAC 전동기의 외란 관측기의 블록도를 나타낸다. 제안된 외란 관측기는 기존의 외란 관측기와 동일하게 속도를 기반으로 전동기의 기계 방정식으로부터 외란 부하를 추종하는 방식이다^[7]. 그림 6에서 역기전력의 현상이 정현파인 BLAC 전동기는 홀센서 기반으로 전기적으로 60도 간격의 위치만을 검출할 수 있지만, 속도 연산을 통해 연속적인 회전위치를 추정하여 d-q축 전류로 토크를 제어하게 된다.

시스템에 적용된 BLAC 전동기의 기계적 운동 방정식에 의한 $\dot{\omega}_m$ 식은 다음과 같다.

$$\dot{\omega}_m = -\frac{B_m}{J_m} \omega_m + \frac{3}{2} \frac{K_t}{J_m} i_q - \frac{T_L}{J_m} \quad (7)$$

단, J_m 및 B_m 은 BLAC 전동기를 포함한 시스템의 관성계수 및 댐핑계수를 나타내고 있으며, K_t 는 토크상수이다. i_q 는 BLAC 전동기의 토크 전류이며, T_L 은 부하 토크를 나타내고 있다.

그림 6에서 설계된 관측기에서 추정된 외란 토크를 보상하는 전류는 \hat{d}_t 로 표현하고 있으며, 보상 전류 \hat{d}_t 를 추정하기 위한 내부 변수로 Z_t 를 도입하여 Z_t 의 미분 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{Z}_t = \frac{G_s}{J_m} \cdot [Z_t + (G_s + B_m) \cdot \omega_m - i_q K_t] \quad (8)$$

$$\hat{d}_t = \frac{1}{K_t} (Z_t + G_s \omega_m) \quad (9)$$

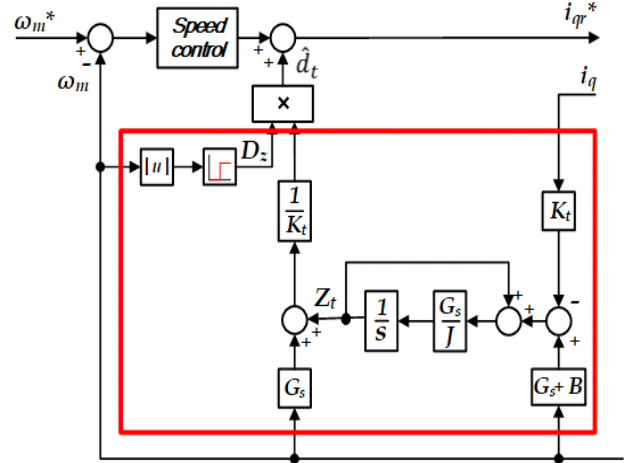


Fig. 6. Proposed disturbance observer with dead zone.

단, G_s 는 외란관측기의 이득이다. 즉, 외란 관측을 위한 내부 변수 Z_t 의 미분 방정식으로 추정되는 외란 토크는 $Z_t + G_s \omega_m$ 이며, 이를 통해 보상 전류는 토크 상수 K_t 를 고려하여 식 (9)로 표현될 수 있다.

홀센서 기반의 BLAC 전동기의 경우, 기존 외란관측기와 달리 속도 정보의 피드백 주기가 운전 속도에 따라 상이하게 된다. 특히, 저속 운전 구간에서는 속도 정보의 피드백 주기가 외란 관측기의 관측 주기에 비해서 수 배 이상 증가하게 되므로, 관측된 외란 부하의 오차가 매우 급격하게 증가하게 된다.

실제 홀센서로 검출되는 검출 주파수는 실제 속도에 따라 다음과 같다.

$$f_{hs} = p \cdot \frac{3}{\pi} \cdot \omega_m \quad (10)$$

단, p 는 전동기의 극쌍수(pole-pair)를 나타낸다.

본 논문에서 적용된 BLAC 전동기는 극쌍수가 8인 전동기로 전기적으로 240Hz 이상의 운전속도 변동에 대한 다이내믹스에 대한 응답을 고려하여, 기계적 속도가 31.4[rad/s]의 속도 이상에서 외란 관측기가 동작하도록 설계하였다. 따라서, 부정확하게 추정된 외란값을 데드존을 통해 저속에서 외란 관측기의 보상전류 \hat{d}_t 를 다음과 같이 제한한다.

$$\hat{d}_t = \frac{D_z}{K_t} \cdot (Z_t + G_s \omega_m) \quad (11)$$

단, $|\omega_m| > 31.4$ [rad/s] 에서 데드존 $D_z = 1$ 이고, 그 이외의 조건에서 $D_z = 0$ 으로 된다.

제안된 데드존을 가지는 외란 관측기의 경우, 설계된 레일 트랙션 시스템의 위치제어에서 초기의 가속 구간 및 감속 구간의 정지 위치 부근에서만 데드존이 발생하고, 연속적인 이동 위치의 제어 영역에서는 외란관측기

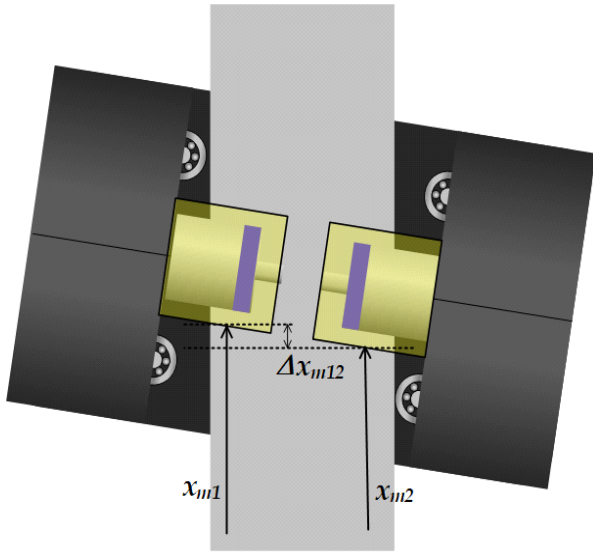


Fig. 7. Zigzag movement of rail traction system.

의 관측결과가 토크 보상 값으로 작용하게 되므로 부하 변동에 따른 위치변동의 억제에 효과적이다.

3.3 듀얼 BLAC 전동기의 위치 오차 보상

제안된 레일 트래クション 시스템의 이상적인 제어는 두 BLAC 전동기가 동일한 선상으로 진행되어야 한다. 하지만 시스템의 슬립현상 및 외란 부하로 인해 그림 7과 같이 두 전동기의 이동거리의 오차가 증가하게 되면, 캐스트 휠과 레일 사이의 마찰을 발생시켜 다른 전동기에 비해 뒤처지는 현상이 발생하게 된다^[8]. 두 전동기에 작용하는 부하의 변동은 그림 6에서 제안된 외란 관측기에서 대부분 보상이 가능하지만, 한 방향으로 치우친 경우에 발생하는 두 전동기의 위치 오차는 부가적인 지그재그 현상을 발생시킬 수 있다. 이러한 현상은 레일과 트래クション 시스템 사이에 기계적인 마찰력 변화를 크게 증가시키게 되어 시스템의 속도 및 위치 제어 성능을 크게 감소시키게 된다.

본 논문에서는 두 전동기의 위치 차이에 대해서 속도 지령을 각 전동기에 대하여 가감함으로써 간단하게 밸런스를 유지하는 비례보상항을 추가하여 지그재그 현상을 억제하며, 두 전동기의 밸런스가 유지되도록 하였다. 이때, 밸런스 유지를 위한 두 전동기의 위치오차와 보상 속도는 다음과 같다.

$$\Delta x_{m12} = x_{m1} - x_{m2} \quad (12)$$

$$\omega_{bc}^* = G_{bc} \cdot \Delta x_{m12} \quad (13)$$

단, G_{bc} 는 두 전동기의 이동거리 오차에 따른 비례 이득이므로, 식 (6)의 순시위치오차에 따른 비례이득과 같은 값으로 선정될 수 있다. 두 전동기의 밸런스 유지를 위한 보상속도 ω_{bc}^* 는 각 전동기에 균일하게 더해지는 것

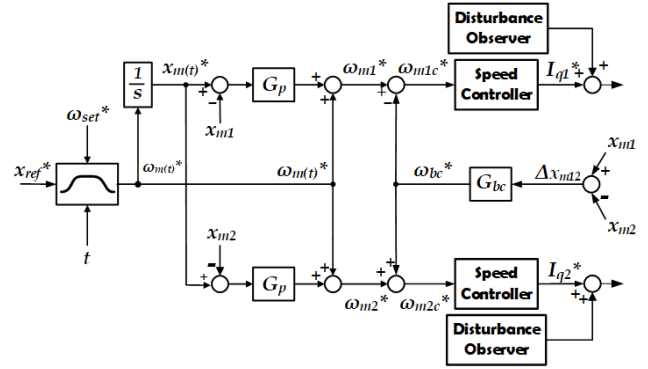


Fig. 8. Proposed position and balance control scheme.

이 아니라, 두 전동기의 속도차이를 통해서 균형을 유지하기 위해서 한쪽 전동기에는 보상속도가 감해지고, 다른 전동기에는 보상속도가 더해지게 된다.

그림 8은 본 논문에서 제안하는 레일 트래クション 시스템의 위치 제어 블록도를 나타내고 있다. 그림 8에서 정해진 지령 위치 x_{ref}^* 에 도달하기 위하여, 현재 위치와의 차이에 의해 그림 5에서 제안된 속도 모델에 의해 운전 시간에 따른 순시 속도 지령 $\omega_{m(t)}^*$ 와 이의 적분에 의한 순시 위치 지령 $x_{m(t)}^*$ 를 통해서 각 전동기에 대한 위치 제어를 위한 속도 지령을 다음과 같이 연산한다.

$$\omega_{m1}^* = \omega_{m(t)}^* + G_p \cdot (x_{m(t)}^* - x_{m1}) \quad (14)$$

$$\omega_{m2}^* = \omega_{m(t)}^* + G_p \cdot (x_{m(t)}^* - x_{m2}) \quad (15)$$

두 전동기의 속도 지령 ω_{m1}^* 과 ω_{m2}^* 에 제안된 밸런스 보상항을 포함한 최종 지령 속도는 다음과 같다.

$$\omega_{m1c}^* = \omega_{m1}^* - \omega_{bc}^* \quad (16)$$

$$\omega_{m2c}^* = \omega_{m2}^* + \omega_{bc}^* \quad (17)$$

4. 실험 결과

본 논문에서 제안된 제어 방식은 실제 제작된 시스템을 이용한 실험 결과를 통하여 그 성능을 검증하였다. 표 1과 표 2는 본 논문에서 설계된 레일 트래クション 시스템의 사양 및 적용된 BLAC 전동기의 구체적인 사양을 나타내고 있다.

제안된 레일 트래クション 시스템의 제어를 위해서 TMS 320F28065를 적용한 듀얼 BLAC 전동기 드라이브를 설계하고, 하나의 제어기로 2개의 전동기를 동시에 제어하도록 구성하였다. 그림 9는 본 논문에서 설계된 레일 트래クション 시스템과 테스트 벤치 및 제어기를 나타내고 있다. 트래クション 시스템의 제어를 위해서 설계된 제어기는 TMS320F28065를 사용하여 하나의 DSP에서 2개의 전동기를 동시에 제어하도록 구현하였다. 각 전동기당 3상

TABLE I
SPECIFICATION OF RAIL TRACTION SYSTEM

Parameter	Value	Parameter	Unit
Gear ratio	26 : 1	Total length	533.2 mm
Total height	510.2 mm	Width	233.2 mm
Upside height	258.6 mm	Inside width	183.2 mm
Rail width	160.0 mm	Rail height	80.0 mm

TABLE II
SPECIFICATION OF TRACTION BLAC MOTOR

Parameter	Value	Parameter	Unit
Power	180 W	Voltage	24 V
Rated current	7 A	Rated speed	4200 r/min
Resistance	0.0894 Ω	Inductance	0.122 mH
Pole-pair	8	Tire radius	115 mm

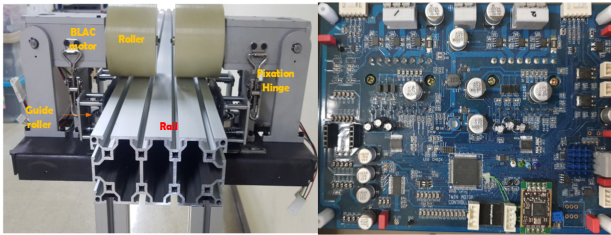


Fig. 9. Rail traction system test bench and controller.

의 전류를 측정할 수 있는 전류센서가 12-bit 임베디드 ADC(Analog to Digital Converter)를 통해서 피드백되고 각 전동기의 홀센서는 3개의 캡처 모듈을 통해서 속도 및 위치를 계산하게 된다. 실험은 설계된 레일 트랙션 시스템에서 요구되는 평균 이동속도 200mm/s를 기준으로 설정하였으며, 이동 거리는 테스트 벤치의 제한으로 1000mm로 지정하였다. 또한 무부하 및 부하의 두 가지 상태로 진행되었으며 외란의 크기는 10N이다.

그림 10과 11은 무부하 상태에서의 실험 결과이며 기존의 위치 제어 방식은 1000mm의 종단위치에서 두 전동기의 밸런스 오차는 2.3mm(0.23%)이며, 제안된 방식의 경우에는 0.2mm(0.02%)의 위치 오차를 보이며, 두 전동기의 밸런스 오차가 크게 개선되고 있음을 보인다.

그림 12와 13은 10N의 급격한 외란 부하를 입력한 상태에서 진행된 기존의 위치 제어 방식과 제안된 제어 방식의 실험 결과를 나타내고 있다. 그림 13에서 최종 종단 위치에서의 두 전동기의 밸런스 오차뿐만 아니라, 급격한 부하 변동에서의 두 전동기의 위치 오차도 크게 개선됨을 보이고 있다. 그림 12와 13에서 급격한 부하 변동에 대해서 기존 방식의 경우 최대 밸런스 오차는 1.61mm이며, 제안된 방식의 경우 0.76mm로 감소하게 된다.

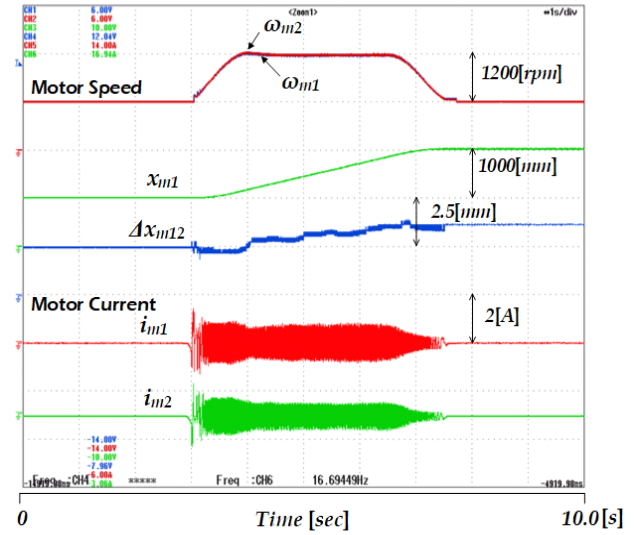


Fig. 10. Conventional position control with no load.

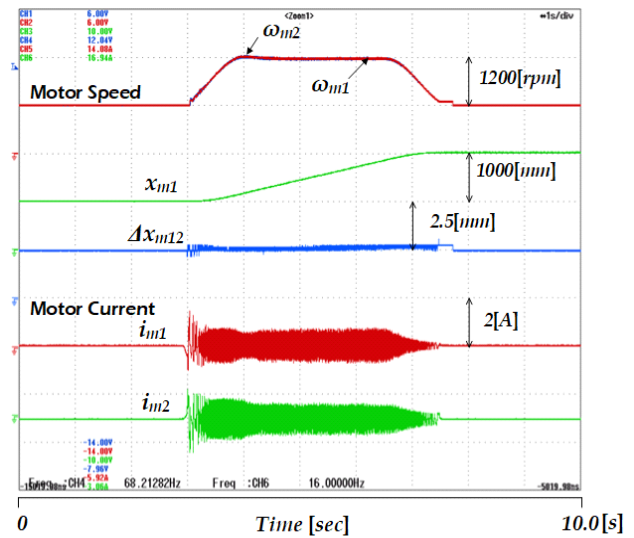


Fig. 11. Proposed balance control with no load.

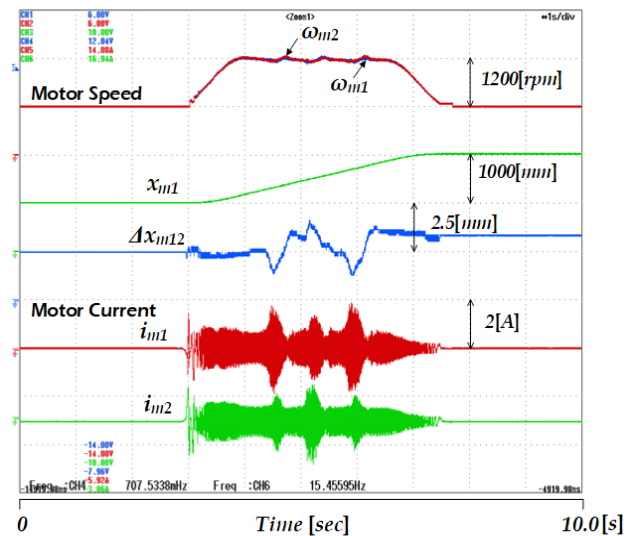


Fig. 12. Conventional position control at sudden load.

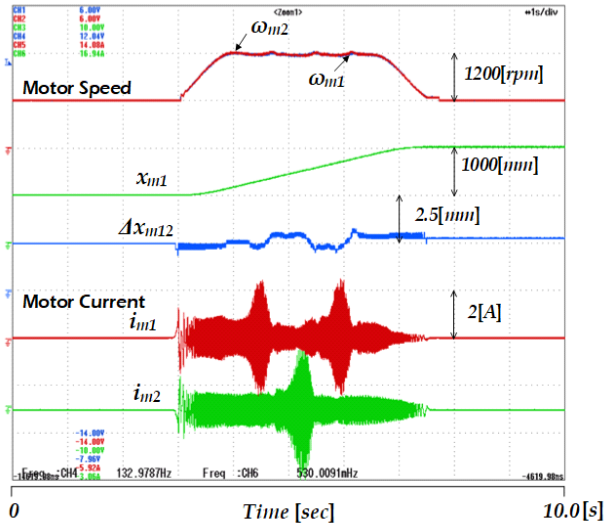


Fig. 13. Proposed balance control at sudden load.

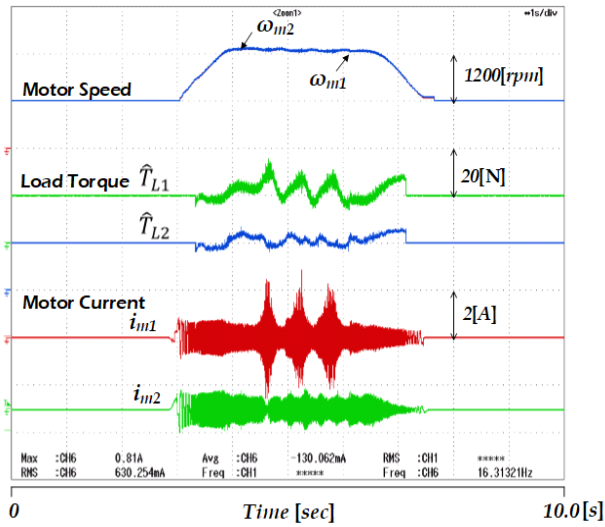


Fig. 14. Estimated disturbance loads by the proposed observer.

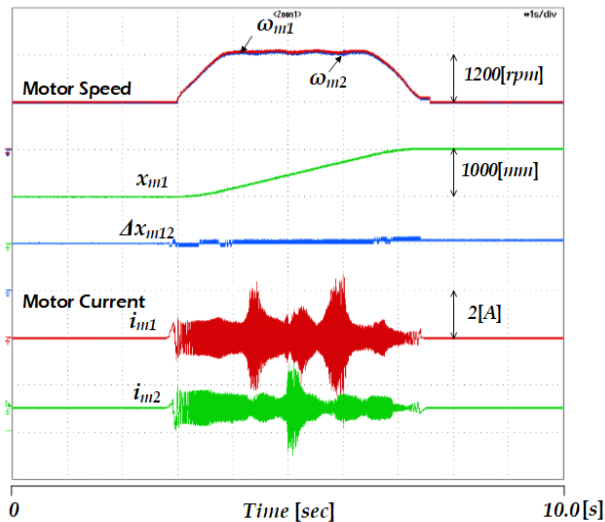


Fig. 15. Precision position control method including disturbance observer with load.

그림 14는 외란 부하에 의한 오차를 보상하고자 제안한 외란 관측기의 성능 검증을 위한 실험 결과이다. 그림 14의 \hat{T}_{L1} 과 \hat{T}_{L2} 는 두 전동기에 입력된 외란을 추정 한 결과를 나타낸다. 1번 전동기에 10N의 외란 부하를 세 차례 입력한 결과를 보여주고 있으며 직접적으로 외란을 받은 1번 전동기의 추정 외란은 입력된 외란을 추정하고 있으며 시스템의 특성에 의해 2번 전동기에 전달된 외란 또한 나타내고 있다.

그림 15는 그림 13의 실험을 통하여 성능이 검증된 외란 관측기를 제안된 정밀 위치 제어 방식에 더하여 진행한 실험 결과이다. 최대 밸런스 오차는 0.25mm를 기록하였으며 위치 오차를 역시 0.02%로 외란 부하에 의한 정밀 위치 제어의 성능을 개선하는데 외란 관측기의 기여를 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 외란 관측기 기반의 듀얼 BLAC 전동기로 구동하는 레일 트래션 시스템의 정밀 위치 제어 방식을 제안한다.

제안된 레일 트래션 시스템은 기존에 연구된 시스템의 문제점들을 보완 및 수정하여 시스템의 풀러를 레일의 상단부로 옮겨 마찰력을 높이도록 설계하였다. 설계된 시스템은 3-D 모델링을 진행 후 FEM 해석을 통하여 안정성을 검토한 후 제작되었다.

제작된 레일 트래션 시스템의 정밀 위치 제어를 위해 순시 운전속도 및 이송 위치 제어 모델로 코사인 가감속 패턴을 적용하였으며, 외란 부하에 의한 위치 제어 정밀도의 저하를 외란 관측기를 통해 보상하였다. 또한 듀얼 BLAC 전동기를 제어함에 있어 발생하는 지그재그 현상으로 인한 밸런스 오차 및 위치 오차를 제안된 밸런스 제어 방식을 통하여 보상하였으며, 이는 무부하 및 10N의 급격한 부하 변동 실험을 통하여 증명되었다.

본 연구는 한국전력공사의 2019년 선정 기초연구 개발과제 연구비(과제번호: R19X001-06)와 2020년도 BB21+ 사업에 의해 지원되었음.

References

[1] J. Xu, J. Liu, J. Sheng, and J. Liu, "Arc path tracking algorithm of dual differential driving automated guided vehicle," in *BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI), Beijing, China*, pp. 1-7, Oct. 2018.

[2] I. Barankova, U. Mikhailova, and G. Lukianov, "Automated control system of a factory railway transport based on ZigBee," in *2016 2nd International*

- Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Chelyabinsk, Russia*, pp. 1-5, May 2016.
- [3] S. G. M. Hossain, H. Jamil, M. Y. Ali, and M. Z. Haq, "Automated guided vehicles for industrial logistics-development of intelligent prototypes using appropriate technology," in *2010 The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE), Singapore*, pp. 237-241, 2010.
- [4] S. Yamamoto, "Development of inspection robot for nuclear power plant," in *Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nice, France*, pp. 1559-1566, May 1992.
- [5] D. Kim, S. Lee, M. Kang, B. Chun, and C. Han, "Proposal of built-in-guide-rail type building façade cleaning robot and its motion planning algorithm," in *2012 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Seoul*, pp. 1004-1009, Aug. 2012.
- [6] J. N. Bae and D. H. Lee, "Position control of a rail guided mover using a low-cost BLDC motor," *IEEE Transactions on Industry Applications*, pp. 2392-2399, May/June 2018.
- [7] L. Xiaoquan, L. Heyun, and H. Junlin, "Load disturbance observer-based control method for sensorless PMSM drive," *IET Electric Power Applications*, Vol. 10, No. 8, pp. 735-743, 2016.
- [8] M. Tomizuka, J. S. Hu, T. C. Chiu, and T. Kamano, "Synchronization of two motion control axes under adaptive feedforward control," *Journal of Dynamic System, Measurement and Control*, Vol. 114, No. 2, pp. 196-203, 1992.



조기완(趙起完)

1994년 4월 27일생. 2019년 경성대 메카트로닉스공학과 졸업. 2019년~현재 동 대학원 메카트로닉스공학과 석사과정.



이동희(李東熙)

1970년 11월 11일생. 1996년 부산대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 2002년~2005년 OTIS-LG 서보 R&D 선임연구원. 2005년~현재 경성대 메카트로닉스공학과 교수.