

# 듀얼 브러쉬리스 모터로 구동하는 레일 트랙션 시스템의 위치제어

조기완, 배종남, 이동희  
경성대학교

## Position Control of Rail Traction System Driven by Dual Brushless Motors

Kiwan Cho, JongNam Bae, Dong-Hee Lee  
Kyungsung University

### ABSTRACT

*Abstract* 본 논문에서는 2개의 브러쉬리스 AC 모터로 구동하는 레일 트랙션 시스템의 설계와 위치제어 방법을 제시한다. 제안된 시스템의 설계에서 롤러와 레일 사이의 미끄러짐 효과를 줄이기 위해 롤러가 레일의 상단 표면에 위치하는 구조로 설계하였다. 레일의 지지대가 상단 중앙에 위치해 있어 두 개의 날개 형태로 롤러가 제작되었으며, 각각의 롤러는 BLAC 모터와 연결되어 있다. 위치제어의 성능을 높이기 위해 코사인 가감속 패턴을 활용하여 구동 시 전류와 속도의 리플을 억제한다. 두 모터의 비선형적인 부하에 의한 밸런스오차를 줄이기 위해 실시간 위치 변화의 밸런스 제어를 제안한다. 제안된 듀얼 BLAC 모터로 구동하는 트랙션 시스템의 위치제어성능은 비교실험을 통해 검증되었다.

### 서론

레일 트랙션 시스템은 일반적으로 자동화 공정, 물류 시스템, 철도 관리, 무인 감시 시스템 등 여러 분야에서 사용되고 있다.<sup>[1-2]</sup> 움직이는 동체는 롤러를 통해 레일을 따라 이동하며 물건 또는 장비를 옮기거나 카메라를 부착해 원격 감시가 가능하다. 가이드 레일은 아스팔트와 같은 거친 표면이 아닌 알루미늄 혹은 철과 같은 표면을 부하가 작고 매끄럽게 가공 가능한 물질로 제작된다. 감시 시스템의 경우 가이드 레일은 천장에 서포트를 통해 연결되며 동체는 레일의 아래쪽에 매달리는 형태이다. 하지만 이러한 구조는 중력으로 인해 동체의 롤러와 가이드 레일간의 마찰력이 줄어드는 문제를 발생시킨다.<sup>[3]</sup>

일부 특수한 레일 트랙션 시스템은 사용자의 필요성에 따라 레일과 동체를 따로 설계하지만 이러한 시스템은 효율적이지만 비용이 저렴하지 않고 커스텀 제작으로 유지보수가 어렵다.

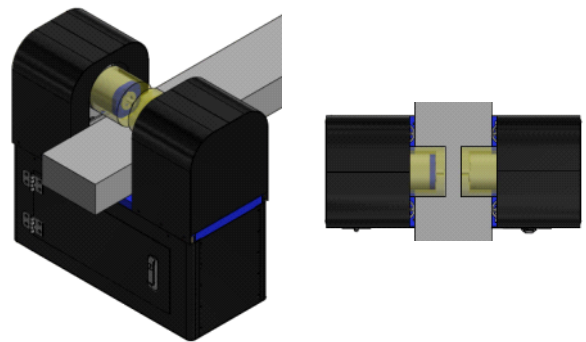
제안하는 시스템의 레일 상부에 동체 및 롤러가 부착되는 오버행 타입은 기계적으로 장력의 조절이 용이하며 롤러와 레일 사이의 마찰력을 동체의 무게를 이용하여 증가시켜 슬립현상을 줄인다. 또한 동체의 롤러를 날개형으로 제작하여 탈부착이 간편하며 유지 및 보수에 유리하도록 설계하였다.

본 논문에서는 지령 값까지의 위치오차와 두 모터 사이의 밸런스오차를 보상할 수 있는 위치 제어 방식을 제안한다. 각각의 위치제어기의 이동 시간을 바탕으로 한 미분제어방식은 갑작스런 움직임의 변화를 줄일 수 있다. 또한 두 모터 사이의 밸런스오차는 제안된 보상 방식을 통해 줄일 수 있다.

### 레일 트랙션 시스템

#### 1. 시스템의 기계적 구조

기존의 레일 트랙션 시스템의 구조는 레일 아래쪽에 롤러가 매달리는 형태의 구조다. 기존 시스템의 BLAC모터는 제안된 시스템과 다르게 롤러 내부에 내장된 형태가 아닌 벨트로 동력을 전달하는 구조이다. 동체의 중력에 의한 무게로 인해 롤러와 레일 사이의 마찰력이 줄어들며 슬립현상이 발생한다. 이로 인해 롤러와 레일 사이의 마찰 증가를 위해 레일 상단의 보조바퀴와 레일 하단의 롤러 사이의 장력을 조절해줄 장비가 필요로 된다.



(a) 제안된 구조의 3D 모델링 (b) 제안된 구조의 수직도

그림 1 레일 트랙션 시스템 3D 모델링 구조

그림 1은 제안된 레일 트랙션 시스템의 3D 모델링 구조를 나타낸다. 기존과 변경된 점에 앞서 크게 다른 점은 하나의 롤러에서 두 개의 듀얼 모터로 롤러가 추가된 점이다. 이는 가이드 레일의 곡선 구간에서 하나의 롤러로 주행이 원활하지 않아 제어를 통해 각 모터의 속도에 편차를 두어 곡선 주행을 원만하게 하기 위해 제안된 방식이다. 또한 기존의 구조로 인해 발생하는 문제점들을 해결하기 위해 롤러, BLAC 모터, 보조바퀴의 위치를 수정하였다. 롤러의 위치를 레일 상단으로 옮겨 중력으로 인해 손실되는 마찰력을 줄였으며 롤러 내부에 모터를 위치시키고 롤러의 외부에 우레탄 마감처리를 하여 슬립현상을 감소시켰다. 가이드 레일의 측면에 보조바퀴를 부착하여 곡선 주행에서의 안정감을 더하고 하단의 보조바퀴는 롤러와 보조바퀴 사이의 장력을 조절해 슬립현상에 대응한다.

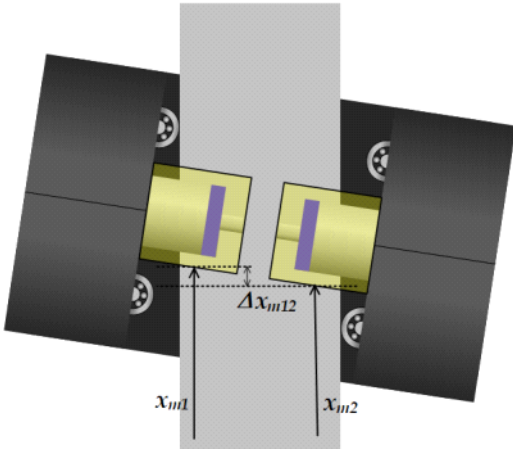


그림 2 모터 속도 편차에 의한 불균형 운동

그림 2는 제안된 듀얼 모터 구조의 실제 구동 특성을 보여 준다. 이상적인 구동에서는 두 모터의 속도와 슬립 조건이 동일하여 두 모터 사이의 밸런스오차가 발생하지 않는다.

하지만 실제 시스템 구동에서는 이상적인 구동과 달리 두 모터의 실시간 이동속도에 차이가 있다. 이는 속도와 슬립의 차이에 의해 발생한다. 이로 인해 발생한 밸런스오차는 구동체가 위치 값이 작은 쪽으로 기운 형태로 운전하게하며 측면 보조바퀴가 직선 구간에서 레일에 닿게 한다. 이는 마찰과 모터의 비선형적인 외란 토크를 증가시킨다. 위의 문제들로 속도 제어 성능의 저하로 최종 지령 위치까지의 오차가 발생한다.

## 2. 제안된 위치 제어 방식

레일 위 구동체의 두 개의 BLAC 모터를 구동함에 있어 앞서 제기된 문제점들과 제어의 정확성과 신뢰성을 위해 다음과 같은 제어 방식을 제안한다.

모터의 구동 시작시점과 종료시점에서 급격한 속도의 변동은 동체에 진동을 일으키게 되므로 이에 본 논문에서 코사인 가감속 패턴을 사용하여 목표위치에 도달하기 위해 속도패턴을 생성한다. 먼저, 이동거리 지령치를 입력하게 되면 코사인 가감속 패턴은 12m/min의 기준속도에 맞춰 실시간 이동속도와 모터의 구동시간을 결정한다. 전체 구동시간의 25%를 차지하는 시작시점에서는 모터의 속도를 천천히 올리고 25%의 종료시점에서도 천천히 늦춰 각 구간의 마찰과 진동을 줄인다. 각 구간에서 가감속 패턴에 의해 기준에 미치지 못한 이동속도는 50%의 정상 동작 구간에서의 속도를 높여 이동거리를 보상한다.

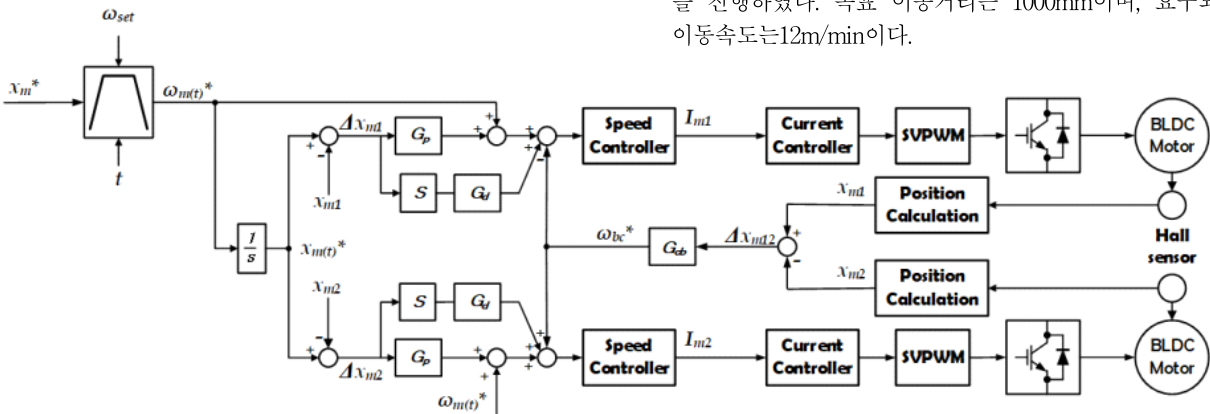


그림 3 제안된 위치 제어 방식 블록도

하지만 가감속 패턴을 활용하여 일정 부분의 진동과 마찰을 줄인다 해도 일치하지 않는 모터의 특성 및 외란에 의해 발생하는 위치오차와 밸런스오차는 제어 성능을 높이기 위해서 여전히 보상이 필요하다.

그림 3은 제안된 위치 제어 방식의 전체 블록도를 나타낸다. 1차적으로 모터의 이동속도를 적분하여 이동거리로 변환하고 홀센서로 측정되는 실제 이동거리와 비교, 비례제어하여 실시간 이동속도에 보상한다. 이는 주어진 이동거리와 실제 이동거리의 위치오차를 실시간으로 보상한다. 두 모터 사이의 밸런스오차는 두 모터의 실제 이동거리의 차이를 비례 상수를 통해 각 모터에 가감하여 보상한다. 추가적인 미분 제어는 한 쪽 모터의 비선형적인 부하 변화에 의한 위치오차 및 밸런스오차에 대응할 수 있다. 모터의 제어를 위한 아래 블록도에서 나타난 위치 제어 방식의 식은 다음과 같다.

$$\Delta x_{m1} = x_{m(t)}^* - x_{m1} \quad (1)$$

$$\Delta x_{m2} = x_{m(t)}^* - x_{m2} \quad (2)$$

$$\omega_{m1s}^* = \omega_{m(t)}^* + G_p \Delta x_{m1} + G_d \frac{\Delta x_{m1}}{dt} - \omega_{bc}^* \quad (3)$$

$$\omega_{m2s}^* = \omega_{m(t)}^* + G_p \Delta x_{m2} + G_d \frac{\Delta x_{m2}}{dt} + \omega_{bc}^* \quad (4)$$

## 실험 결과

제안된 레일 트랙션 시스템의 설계와 두 개의 BLAC 모터의 위치 제어 방식을 실험하기 위해 시스템을 제작하였다. 표 1은 제작된 시스템의 BLAC 모터의 특성을 나타낸다.

표 1 구동용 BLAC 모터 특성

Parameter	Value	Parameter	Value
Power	180 W	Voltage	24 V
Rated Current	7 A	Rated Speed	4200 r/min
Resistance	0.0894 Ω	Inductance	0.122 H
Pole-pair	8	Roller Radius	115 mm

제안된 위치 제어 방식을 검증하기 위해 기존의 비례 제어, 밸런스 제어 및 제안된 제어 방식을 순차적으로 비교하여 실험을 진행하였다. 목표 이동거리는 1000mm이며, 요구되는 평균 이동속도는 12m/min이다.

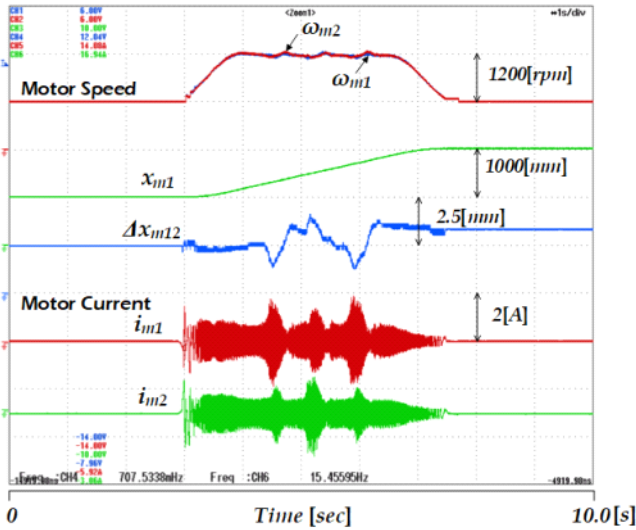


그림 4 기존의 위치 제어 방식

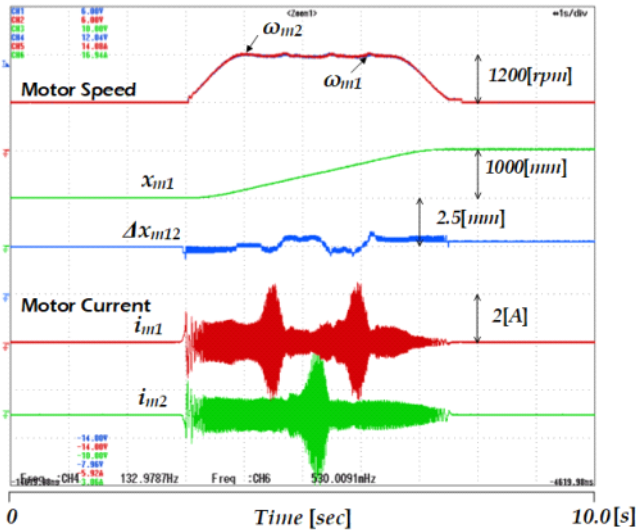


그림 5 밸런스 위치 제어 방식

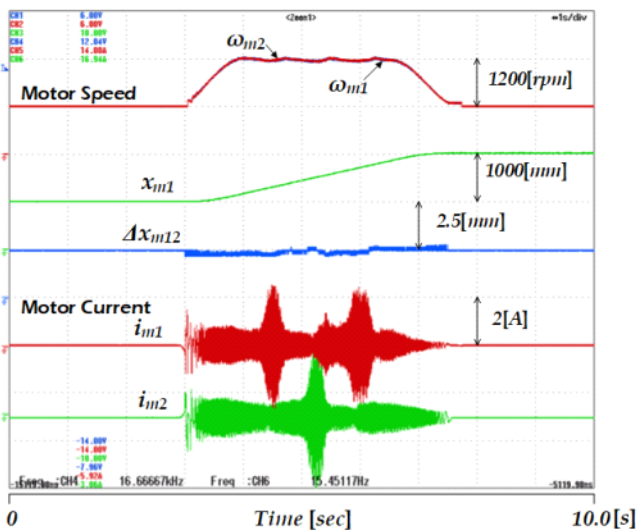


그림 6 제안된 위치 제어 방식

그림 4, 5, 6 은 논문에 제시된 세 가지의 제어 방식으로 1→2→1번 모터 순서로 10N 크기의 부하를 인가하여 실험한 결과이다.

그림 4의 기존 제어 방식의 결과에서 부하가 발생할 때 목표 이동거리와의 위치오차는 1% 이내이나 두 모터 사이의 밸런스오차 값이 크게 발생하며 구동이 종료되는 시점까지 줄어들지 않고 유지되고 있다. 반면 그림 5의 밸런스 위치 제어 방식에서는 구동모터간의 오차의 급격한 변화는 줄었지만 오차가 유지되어 진행된다. 그림 6의 제안된 방식에서 밸런스오차는 영점에 가까운 완만한 변화를 보여주며 구동의 시작점부터 오차는 0.5mm 이내로 유지된다. 실험결과는 제안된 제어 방식이 외란으로 발생한 진동과 마찰에 의한 위치오차 및 밸런스오차를 보상할 수 있음을 보여준다.

## 결론

본 논문에서는 2개의 BLAC 모터를 이용한 날개 타입 레일 트래クション 시스템의 설계와 위치 제어 방식을 제안한다. 기존의 레일 시스템의 롤러가 레일의 하부에 있어 동체의 하중에 의한 슬립 효과를 줄이기 위해 롤러가 상부에 위치하여 동체 하중이 롤러의 마찰력을 증가시키도록 설계하였으며, 2개의 구동모터가 날개방식으로 결합되어 레일에서의 탈부착이 용이하도록 하였다.

제안된 트래クション 시스템에서 듀얼 모터 사이의 간단한 밸런스 보상과 지령 값과 실제 값의 차이의 위치오차의 실시간 보상을 알고리즘을 적용하였다. 구동 시의 기계적인 진동을 줄이기 위해 제안된 실시간 속도 및 위치 지령 값은 코사인 가감속 패턴을 사용하였고, 제안된 두 구동 전동기의 위치오차는 제안된 실시간 밸런스 보상으로 균형이 이루어진다. 제안된 위치오차 제어기는 급작스런 진동과 비선형적인 부하에 대한 설계된 레일 트래クション 시스템의 위치오차를 저감하게 된다.

실험결과는 제안된 위치 제어 방식이 지령 값과의 위치오차와 두 모터 사이의 밸런스오차를 개선시켰음을 보여준다.

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

## 참고 문헌

- [1] I. Barankova, U. Mikhailova and G. Lukianov, "Automated control system of a factory railway transport based on ZigBee," 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Chelyabinsk, 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICIEAM.2016.7910923.
- [2] S. G. M. Hossain, H. Jamil, M. Y. Ali and M. Zahurul Haq, "Automated guided vehicles for industrial logistics - Development of intelligent prototypes using appropriate technology," 2010 The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering, Singapore, 2010, pp. 237-241, doi: 10.1109/ICCAE.2010.5451466.
- [3] J. N. Bae, D. H. Lee, "Position Control of a Rail Guided Mover Using a Low-Cost BLDC Motor", IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. 54, No. 3, pp. 2392-2399, May/June, 2018.