

# RGV 주행안정성 개선을 위한 다축 제어 구동시스템 개발

## Development of the driving system with multiple spindle control for the improvement of running stability of RGV

안성혁\*<sup>†</sup>, 이성진\*\* , 이진욱\*\* , 사공명\*\*

Sung-Hyuk Ahn\*<sup>†</sup>, Sung-Jin Lee\*\* , Jin-Wook Lee\*\* , Myung Sagong\*\*

**Abstract** The conventional driving system used on the railway has the structure that both wheels are combined with the common driving axis. But, the running stability will be degraded as a reason for the irregular speed or motion by the imperfections of rail such as a track irregularity or abrasion, if this structure used in the miniaturized RGV (Rail-Guided Vehicle) system for the inspection of rail or tunnel. Therefore, we are proposed the novel method for the improvement of running stability of RGV which has the characteristics of low weight (100Kg), low running speed (10km/hr.), and autonomous vehicle.

**Keywords** : Tunnel Scan, Tunnel Inspection, Autonomous Vehicle, Multi-axis Motor, Driving Control

**초 록** 철도레일에서 운용하는 차량의 일반적인 구동방식은 좌, 우측 바퀴를 동일한 구동축에 연결하여 동력을 전달하는 방식을 적용하고 있으며 일반 철도차량과 달리 철도레일이나 터널의 검사목적으로 운용되는 소형 운반체(RGV)의 경우에는 정밀한 주행속도의 유지가 검사의 정밀도와 신뢰성 확보를 위한 주요한 성능요건이 되는 특징을 가진다. 그러나 경량차체(≤100Kg)와 저속주행(≤10km/hr.) 및 자체동력에 의한 자주식 운용의 특성을 가지는 RGV 시스템에 좌, 우측 바퀴가 연결된 단일 구동축을 적용할 경우, 궤도의 상태에 따라 양측 바퀴의 회전속도 및 이동거리의 차이가 발생하여 정속 유지와 궤도 상태에 따른 정밀제어가 어려운 단점을 가진다. 따라서 본 논문에서는 RGV 시스템에 독립된 다축 제어 방식의 구동시스템을 개발하여 적용함으로써 주행안정성을 개선하는 방법을 제안하고자 한다.

**주요어** : 터널스캔, 터널검사, 자율주행, 다축모터, 운전제어

## 1. 서 론

일반적으로 철도차량의 구동부는 양측 차륜이 동일한 구동축에 고정되어 연결된 구조를 가지며 이에 대한 주행안전성과 승차감, 등의 개선을 위한 연구[1-3]가 꾸준히 수행되고 있으나 근본적인 구동축의 구조 개선보다는 ATP/ATO를 이용한 열차제어시스템[4], 등의 개발과 같이 주행제어와 운전시스템의 개선에 집중되어 있다. 그러나 철도 레일이나 터널, 등 철도시설물 검사를 위하여 사용되는 경량차체(100Kg)와 저속주행(10km/hr.) 및 자체동력에

† 교신저자: (주)상상돔 LIS융복합기술연구소(karishuma70@gmail.com)

\* (주)상상돔 LIS융복합기술연구소

\*\* 한국철도기술연구원

의한 자주식 운용의 특성을 가지는 자율 주행 시스템(RGV, Rail-guided Vehicle)에 대하여 일반적인 철도차량과 같은 방식의 구동축을 적용할 경우, 현저히 낮은 차체 중량, 등의 차이에 따라 선로의 상태(궤도틀림, 마모상태, 캔트, 등)에 민감하게 영향을 받는 단점을 가지게 되며 특히 터널과 같은 원거리 시설물에 대한 측정과 검사에서 정속 주행 및 저진동 유지의 주행안정성을 확보하지 못하게 되어 측정 정밀도 저하, 등의 측정 신뢰성에 대한 문제가 발생하게 된다. 따라서 본 논문에서는 RGV에 전, 후진이 가능한 전륜 구동 방식의 독립된 다축 구조 및 제어 시스템을 가지는 구동시스템을 개발함으로써 주행안정성을 개선하는 방법을 제안하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 시스템 구성 및 운전 제어 프로세스

#### 2.1.1 구동부

제안하는 다축 제어 구동 시스템의 구조 및 구성은 Fig. 1과 같으며 각 구동축에는 최대 전류 3.6A와 2.10kgfcm의 부하토크를 가지는 60W, Brushed Motor를 적용하였으며 중공축 엔코더를 사용하여 주행 중 양 축의 이동거리를 실시간 측정하여 주행속도를 보정하도록 하였다.

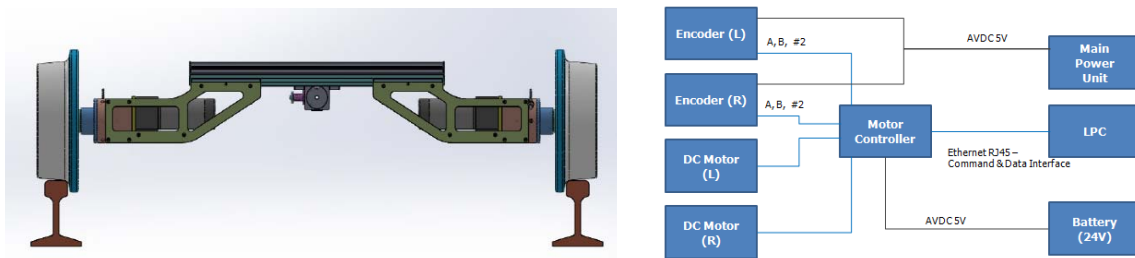


Fig. 1 Design & structure of the driving system with multiple spindle control

또한 각 구동축 제어를 위한 통합 제어 시스템은 RISC 기반의 마이크로 컴퓨터가 내장된 모터 컨트롤러를 사용하여 Fig. 2에서 도시한 Closed-loop 시스템을 구성하여 적용하였고 모터에 인가되는 구동전원은 Voltage Drive 및 Current Drive, Velocity Loop 모드에 의한 운전 알고리즘을 설정하여 적용할 수 있도록 하였다.

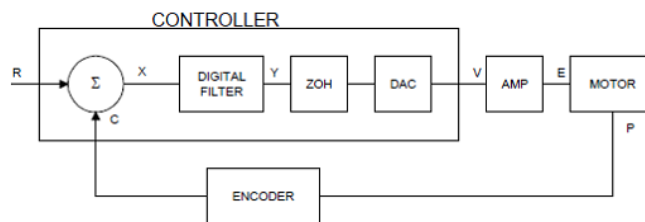


Fig. 2 Block diagram of integrated control system

### 2.1.2 구동축의 특성 동일화

동일한 모터와 구조로 구동부를 구성, 제작하더라도 독립된 구동축을 가지는 구동 시스템이 완전하게 일치하는 구동 특성을 확보하는 것은 불가능하다. 따라서 좌, 우측 바퀴의 이동거리를 실시간 측정함으로써 정밀한 속도제어와 정속 유지의 성능을 구현하기 위하여 양 구동축의 특성을 일치시키는 작업이 선행되어야 하며 이를 위하여 Fig. 2와 같이 각 구동축에 적용된 PID 디지털 필터를 적용하고 최적화된 PID 파라미터를 찾기 위하여 교차주파수(Crossover Frequency)기반의 튜닝을 수행하였다. 그 결과로 Fig. 3과 같이 응답 결과를 통하여 각 축의 구동특성이 일치하게 되는 PID 파라미터를 찾아 시스템에 적용하였다.

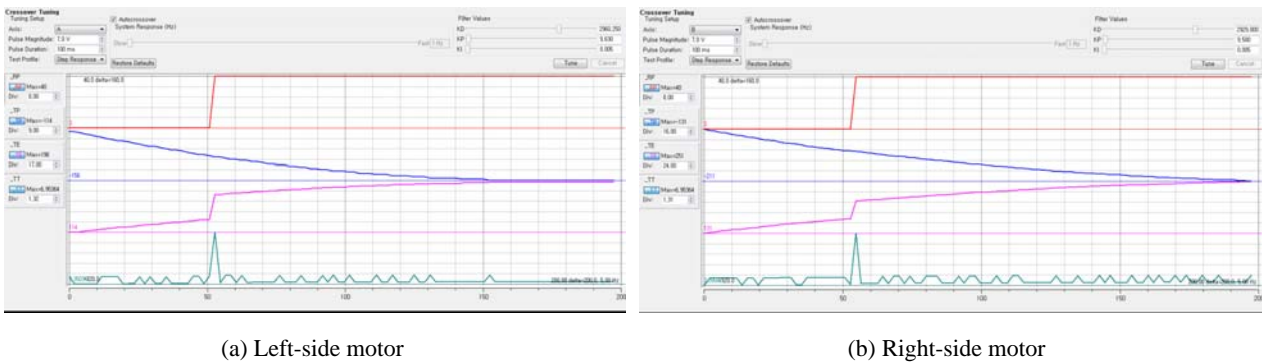


Fig. 3 Step response of PID-controlled both-side motor

상기의 방식에 따라 RGV의 전체 중량이 가해진 상태에서 최대 운전속도(6km/hr.)까지 주행안정성을 확보하기 위한 양축의 PID 파라미터 값은 Table 1과 같다.

Table 1 Result PID parameter of each motor

Position	Filter Parameter		
	$K_p$	$K_D$	$K_I$
Left-side	9.630	2960.250	0.005
Right-side	9.500	2929.000	0.005

### 2.2.3 정속 주행을 위한 운전 알고리즘

구동부의 양축을 구동하는 모터와 결합된 엔코더로부터 모터 회전 시 발생하는 펄스 출력값을 확인하여 최대 1kHz 단위로 각 축의 이동거리를 계산하여 양 축의 회전속도를 실시간으로 제어하여 궤도의 불균형(Track Irregularity)이나 캔트(CANT)에 의하여 발생하는 좌, 우 궤도의 이동거리 차이에 의한 다양한 운전환경에 동적으로 대응할 수 있도록 하였으며 특히 모터에 파워를 공급하는 전원 모듈의 경우 모터에서 발생하는 역전류에 대한 손상을 최소화하도록 Isolation 된 드라이버 채널을 구성하여 적용하였고 그 결과는 Fig. 4와 같다.

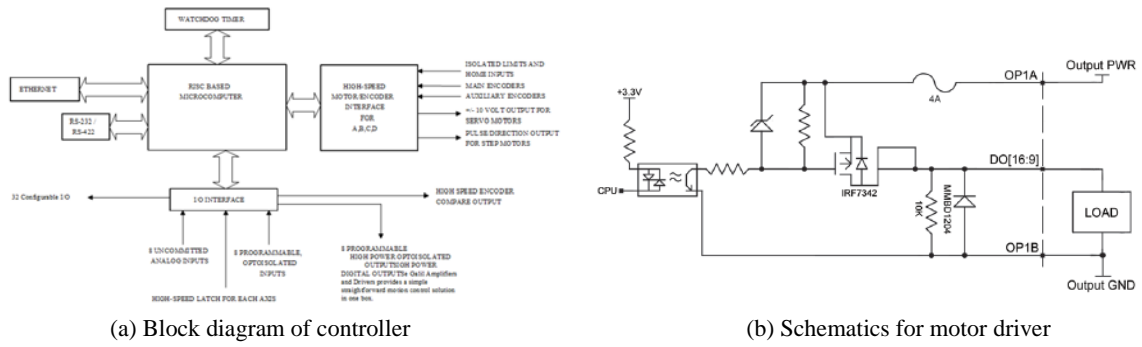


Fig. 4 Hardware for motor control & drive

이때 운전 알고리즘 설정을 위한 각 모드에 대한 모델과 전달함수는 Table 2와 같다.

Table 2 Model and Transfer function of driving control

Control mode	
Voltage Driver	
	$P/V = K_v / [K_t S (ST_m + 1)(ST_e + 1)]$
Current Driver	
	$P/V = K_a K_t / J s^2$
Velocity Loop	
	$\omega / V = [K_a K_t / J s] / [1 + K_a K_t K_g / J s] = 1 / [K_g (sT_1 + 1)]$

## 2.2 모의 시험

PID 튜닝이 완료된 상태에서 각 구동축에 무부하 및 부하 상태에서의 Lab Test를 수행하였으며 무부하 상태에서의 속도 측정 결과는 Fig. 5와 같다. Fig. 5의 측정결과는 위에서부터 좌측 모터의 속도(VL), 우측 모터의 속도(VR), 좌측 모터의 토크(TL), 우측 모터의 토크(TR)이며 VL과 VR은 가감속 시퀀스에 따라 일정하게 움직이는 반면 각 모터의 토크는 적용된 PID 파라미터에 따라 각기 다른 결과를 보여줄 수 있다. 즉, 각 모터에 걸리는 토크가 가변적으로 조정됨으로써 독립된 두 축이 일정한 속도와 이동거리를 가짐으로 정속을 유지하게 되는 것을 확인할 수 있다.

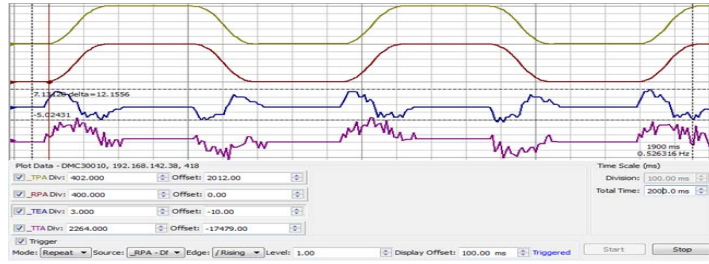


Fig. 5 Result of lab test with load

### 2.3 현장 시험

제작된 RGV를 이용하여 Fig. 6에서 보는 바와 같이 현장 시험을 수행하였으며 현장 시험 시 RGV 차체의 총 중량에 대하여 모의 시험을 통하여 튜닝된 PID 파라미터의 확인 작업을 선행하여 실제 운전상태에 대한 최적화된 PID 파라미터를 수정하여 적용하였다.



Fig. 6 Field test

최종적으로 적용된 PID 파라미터에 의한 구동부의 시스템 모델 및 시스템의 주파수 응답의 Bode Plot은 Fig. 7과 같다.

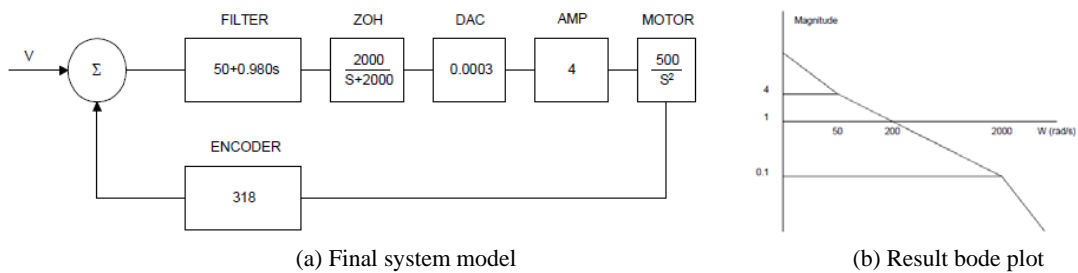


Fig. 7 Result of final system design

최종적으로 적용된 구동부의 시스템에 의한 실제 주행 결과는 Fig. 8과 같다. Fig. 8의 측정결과는 위에서부터 좌측모터의 속도(VL), 우측 모터의 속도(VR), 좌측 모터의 토크(TL), 우측 모터의 토크(TR), 좌측 이동거리(DL), 우측 이동거리(DR)이며 VL과 VR이 동일한 속도와 가속 속 패턴을 가지며 변화하는 동안 TL과 TR은 동적으로 변화하며 각 축의 모터가 지정된 속도로 구동할 수 있도록 실시간 조절하고 있음을 알 수 있으며 그 결과로 DL 및 DR에서 보이는

이동거리가 동일하게 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 이때 양 축의 이동 속도는 4km/hr의 속도에서  $\pm 1.2\text{mm/sec}$ 의 범위 내에서 차이를 보임을 확인하였다.

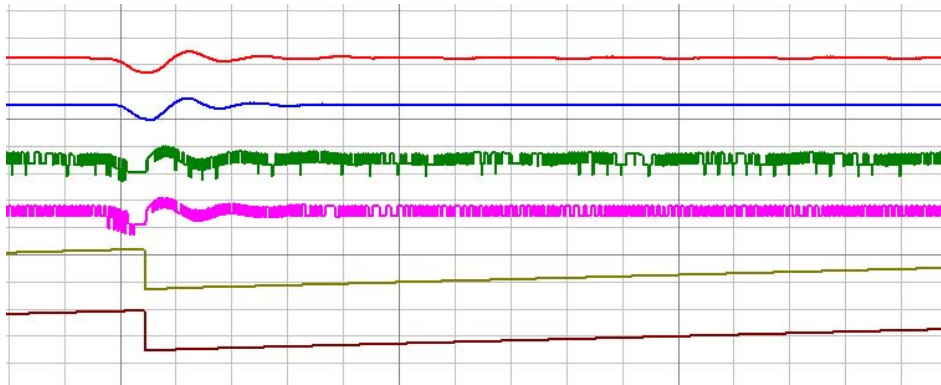


Fig. 8 Result of lab test with load

### 3. 결 론

본 연구에서는 경량화된 자율주행시스템에 독립된 구동축을 적용하여 주행 제어를 실시함으로써 정밀한 정속도 유지를 기반으로 하는 주행 안정성을 확보하여 RGV에 탑재된 측정 시스템의 측정 정밀도를 극대화하기 위한 기법을 개발하고자 하였다. 이를 위하여 각 구동축에 최적화된 PID 필터의 파라미터를 적용하고 독립된 각 구동축이 동일한 구동 특성을 가지도록 보정하여 실시간 속도제어를 수행함으로써 4km/hr의 저속 주행 구간에서  $\pm 1.2\text{mm/sec}$ 의 오차범위를 가지는 주행 안정성을 확보함을 확인하였다.

### 참고문헌

- [1] 엄범규, 강부병, 이희성 (2012) 소형탈선시뮬레이터를 이용한 1/5 축소대차의 주행안정성 시험, *한국철도학회논문집*, 15(1), pp.9-16
- [2] Iwnicki S. D., Wickens A.H. (2004) Validation of a Matlab Railway Vehicle Simulation using a Scale Roller Rig, Rail Technology Unit, Manchester Metropolitan University, Department of Engineering & Technology A continuum model for zigzag carbon nanotubes, *Applied Physics Letters*, 86(3), pp. 551-561.
- [3] Addisu Negash (2012) Analysis of Wheel/Rail Contact Geometry and Applied Load Conditions on the Rail Head Surface, MA Thesis, Addis Ababa University
- [4] 전조원, 송용훈, 정희준, 김구식, 강주희 (2014) 완전자동운전(DTOAJTX)) 도입을 위한 ATP/ATO 열차제어시스템 기술적 개량 방안 연구, *한국철도학회 추계학술대회*, 14(10), pp.100-105