

바이모달 트램 군집주행 안정성 및 성능향상을 위한 통신 기반 제어 알고리즘 개발

Development of control algorithm based on vehicle inter-communication for the improvement of performance and stability of bimodal tram platoon system

김순오*, 정구용*, 황현철**, 오용국**, 이형철***†

Soon-oh Kim*, Koo-yong Jeong*, Hyeon-Chyeol Hwang**, Yong-Kuk Oh**, Hyeong-cheol Lee***†

Abstract This paper is concerned with how to improve the string stability by enabling communication between bimodal tram. In order to improve the performance and reliability of the entire platoon, a new control algorithms is proposed. MFCC is the algorithm that control brake and throttle without brake system model and power train model using acceleration and distance between vehicles. It is possible to send and receive information of velocity and acceleration freely between bimodal tram traveling in the same direction via the vehicle communication. The simulation model for performance evaluation, taking into account the mechanical specifications and characteristics of the bimodal tram is configured using CarSim and the control algorithm is designed using MATLAB/Simulink. In order to verify the performance of the proposed control algorithm, it is compared to the performance of the platoon algorithm that do not apply the vehicle communication.

주요어 : Bimodal tram, Platoon, string stability, vehicle inter-communication

초 록 본 논문에서는 바이모달 트램간 통신을 적용하여 String Stability를 개선하는 방법을 소개한다. 군집주행 전체의 성능과 안정성을 향상시키기 위해 기존의 Model Free Cruise Control(MFCC) 알고리즘에 차량간 통신을 결합한 새로운 제어 알고리즘을 제안한다. MFCC란 파워트레인이나 브레이크 시스템 모델 없이 차량간 속도, 가속도, 거리 정보를 이용하여 스로틀과 브레이크 인풋을 제어하는 알고리즘을 말한다. 차량간 통신을 통해 동일 방향으로 주행하는 바이모달 트램간에 자유롭게 속도 및 가속도 정보를 주고받을 수 있다. 성능 평가를 위한 모의실험 모델은 바이모달 트램의 제원 및 역학 특성을 고려하여 CarSim을 이용해 구성하고, 제어 알고리즘은 MATLAB/Simulink를 이용하여 구현한다. 제안한 제어 알고리즘의 성능 검증을 위해, 통신을 적용하지 않은 군집주행 알고리즘의 성능과 비교한다.

주요어 : 바이모달 트램, 군집주행, string stability, 차량간 통신

† 교신저자: 한양대학교 공과대학 전기생체공학부 (hcllee@hanyang.ac.kr)

* 한양대학교 공과대학 전기공학과

** 한국철도기술연구원

*** 한양대학교 공과대학 전기생체공학부

1. 서론

최근 운전자의 편의성과 안정성이 극대화된 최첨단 지능형 자동차의 개발이 이슈가 되고 있다. 지능형 자동차란 주변의 환경과 도로의 상태, 주행 상황까지 판단하여 운전자의 명령 없이도 스스로 차량을 제어하는 자동차를 말한다. 이러한 지능형 자동차는 교통 효율성을 높이고, 연비를 개선하며, 교통사고까지 줄임으로써 미래의 핵심 교통 수단으로 주목 받고 있다. 그 중에서 전방 차량과의 안전거리 및 속도를 유지하며 자율주행이 가능한 ACC(Adaptive Cruise Control) 기술을 기반으로 하여, 여러 대의 차량이 짧은 간격을 유지하면서 도로의 효율성 및 에너지 효율성까지 높이는 군집주행 기술 개발이 많은 관심을 받고 있다.

본 논문에서는 한국철도기술연구원에서 개발한 바이모달 트램에 군집주행 기술을 적용하여 자율주행이 가능한 바이모달 트램 군집주행 알고리즘을 소개한다. 기존의 ACC 알고리즘인 MFCC를 적용하여 바이모달 트램 군집주행을 재현한다. 하지만 전방에 진행되는 한 대의 트램에 대한 속도와 거리정보만으로는 군집주행 전체의 안정성을 보장할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 선두트램의 속도 및 가속도 정보를 후방 트램에 송신이 가능하도록 차량간 통신을 적용하여, 군집주행 전체의 성능을 향상시키고 안정성을 보장하는 새로운 Cooperative Model Free Cruise Control(CMFCC) 알고리즘을 제안한다.

2. 군집주행 모델링

바이모달 트램의 모델은 'Fig.1'과 같은 바이모달 트램의 제원과 역학적 특성을 고려하여 CarSim 모델로 구현하였다.

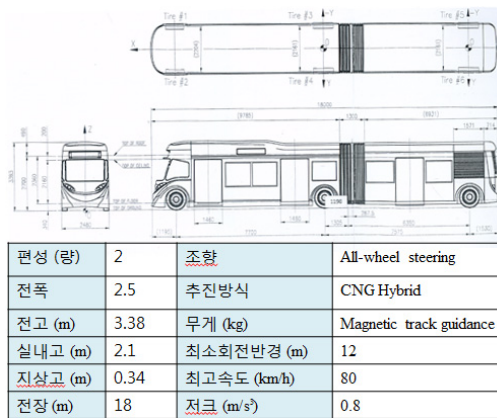


Fig. 1 Basic specifications of bimodal tram (자료출처:한국철도기술연구원)

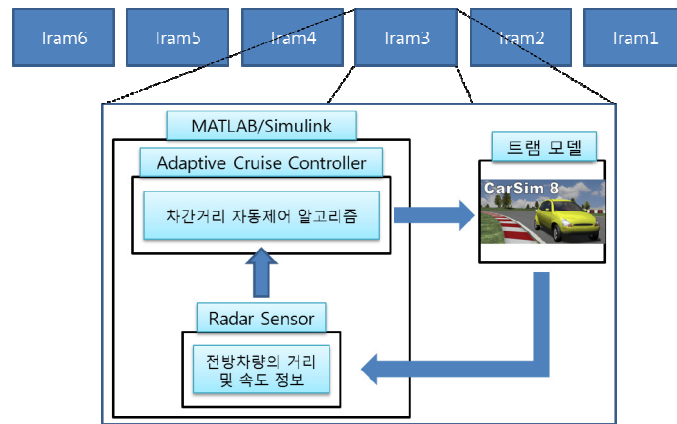


Fig. 2 MATLAB/Simulink-CarSim Software

‘Fig.2’는 본 연구를 위해 개발한 MATLAB/Simulink-CarSim의 연동 시뮬레이션 (Co-Simulation) 환경을 나타낸다. CarSim으로부터 받은 트램의 운동정보를 레이더 센서 모델로 전송하고, 레이더 센서 모델에서 받은 전방 트램의 거리 및 속도 정보를 통하여 차간거리 자동제어 알고리즘을 구현하였다. 여기에서 차간거리 자동제어 알고리즘은 MFCC 알고리즘으로 구현하였다[1].

2.1 문제 설정

군집주행의 종 방향 속도제어는 ACC 알고리즘에 기초한다. 일반적으로 ACC 알고리즘은 전방 차량과의 상대속도와 거리 정보를 토대로 제어 입력을 결정한다. 따라서 ACC 알고리즘을 이용해 구현한 군집주행은 전방에 진행하는 차량 한 대에 대한 정보만을 이용함으로써 가지는 한계가 존재한다. 전방차량의 정보만을 가지고 구현한 군집주행의 속도와 거리오차는 다음과 같다.

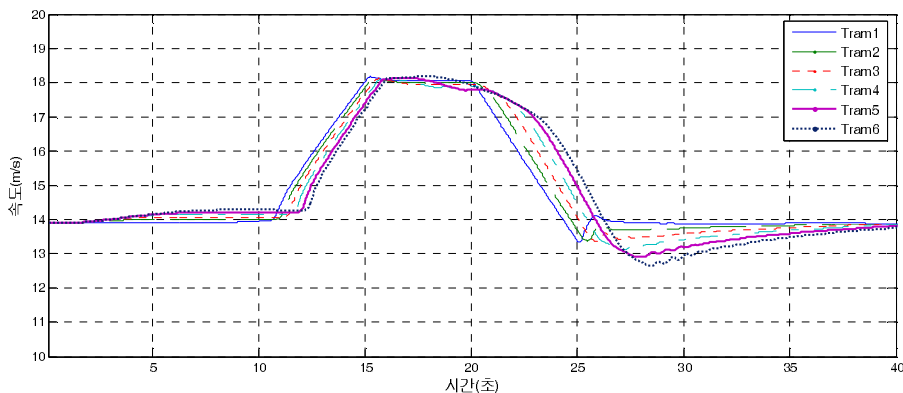


Fig. 3 Platoon system without vehicle inter-communication (time-velocity)

‘Fig.3’과 ‘Fig.4’는 MFCC 알고리즘을 적용하여 구현한 군집주행 정보를 도시하고 있다. ‘Fig.3’에서 나타나듯이 추종 트램들이 선행 트램을 쫓아가는데 시간지연이 발생하게 된다. 여기서 발생하는 시간지연은 교통의 효율성을 떨어뜨려 결과적으로는 군집주행의 성능을 저하시

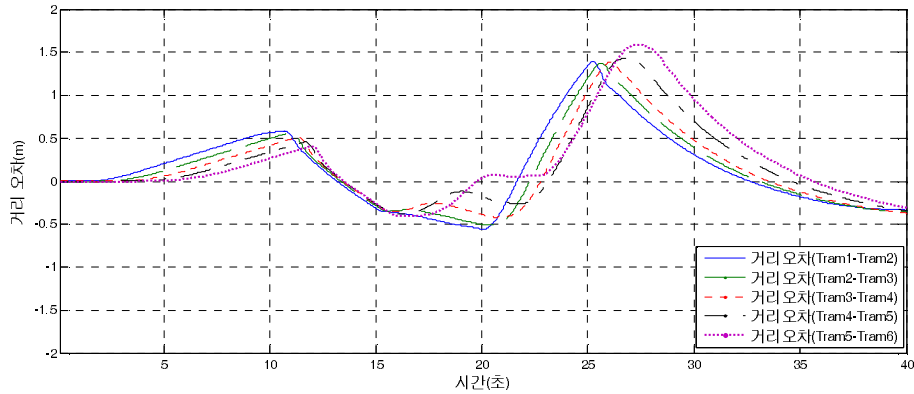


Fig. 4 Platoon system without vehicle inter-communication (time-spacing error)

킨다. 또한 ‘Fig.4’에서는 선행 트램으로부터 추종 트램쪽으로 전파될수록 거리오차가 점점 더 증폭되는 현상이 나타난다. 따라서 전방트램의 정보만으로는 균집주행의 안정성을 보장할 수 가 없음을 확인할 수 있다.

3 통신을 적용한 균집주행

본 논문에서는 전방의 차량 정보만을 이용하는 MFCC 알고리즘에 차량간 통신을 통해 선행 트램 정보까지 이용하여 균집주행의 성능과 안정성을 향상시키는 Cooperative Model Free Cruise Control(CMFCC) 알고리즘을 제안한다. CMFCC는 전방 트램과의 거리를 유지하면서 선두 트램의 속도 변화를 따라가도록 한다.

3.1 Design of Cooperative Model free Cruise Control

일반적으로 차량 가속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다[1].

$$a_s = K_t \alpha - K_b P_b + z \quad (1)$$

여기서 a_s 는 대상 차량 가속도, α 는 스톱틀 각도, z 는 zero throttle acceleration, K_t 와 K_b 는 입력과 차량반응의 관계를 나타낸다. 엔진 토크는 스톱틀 각에 비례하고, 차량 감속은 브레이크 압력에 비례한다. 다른 입력이 없다면 차량은 공기 저항력이나 구름 저항력에 의해 감속한다.

선두 차량과의 속도와 전방차량과의 거리에 대한 상태공간표현법(state space representation)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_1 &= d_{lead} - d_s - c & x_2 &= v_{lead} - v_s \\ \cdot & & & \\ x_1 &= x_2 & & \\ \cdot & & & \\ x_2 &= a_{lead} - a_s & & \end{aligned} \quad (2)$$

x_{lead} , x_s 는 선두차량과 자신의 차량의 위치를 나타낸다. 여기서 c 는 상수이며 선두차량에서 전방차량까지의 거리를 나타낸다. a_{lead} , a_s 는 선두차량의 가속도와 자신의 차량의 가속도를 나타낸다. ‘식 (1)’ 에 의해 ‘식(2)’ 는 다음과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= a_{lead} - KU + z \quad K = [K_t \quad -K_b] \quad U = [\alpha \quad P_b]^T \end{aligned} \quad (3)$$

‘식 (3)’ 에 기초하여, 컨트롤 입력은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$U = \frac{1}{K} (a_{lead} + z + v) \quad (4)$$

트래킹 오차(tracking error)로 정의된 v 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} e_1 &= d_{des} - d & e_2 &= v_{rel} \\ v &= g_1 e_1 + g_2 e_2 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 d_{des} 는 차량간 목표 거리를 나타내고, g_1 과 g_2 는 거리오차와 속도오차에 대한 제어 이득(control gain)을 나타낸다. 여기서 제어 이득 g_1 과 g_2 는 직접적으로 운전자가 느끼는 편안함이나 안정성에 영향을 미치므로 신중하게 결정 되어야 한다. 제어 이득 값은 최적 제어 이론(Optimal Control Theory)에 의해서 결정하였다[2].

따라서 ‘식(4)’ 를 다시 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{K_t} (a_{lead} + z + g_1 (d_{des} - d) + g_2 v_{rel}) \\ P_b &= \frac{1}{K_b} (a_{lead} + z + g_1 (d_{des} - d) + g_2 v_{rel}) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 K_t 와 K_b 의 결정은 VCC_s Update Algorithm에 의해 결정한다[1].

4 시뮬레이션

4.1 군집주행 속도 비교

개선된 알고리즘을 적용하여 군집주행의 시간에 따른 속도 그래프를 나타내었다.

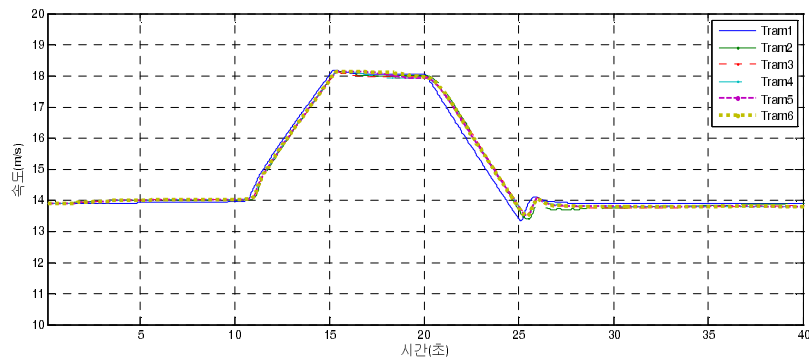


Fig. 5 Platoon system with vehicle inter-communication (time-velocity)

‘Fig.5’와 같이 차량간 통신이 적용된 군집주행은 선행 트램과 추종 트램의 속도 오차가 상당히 줄어들었음을 확인할 수 있다. 따라서 통신이 적용되지 않은 군집주행에 비해 교통의 효율성을 증가시켜 군집주행의 성능을 향상시킬 수 있다.

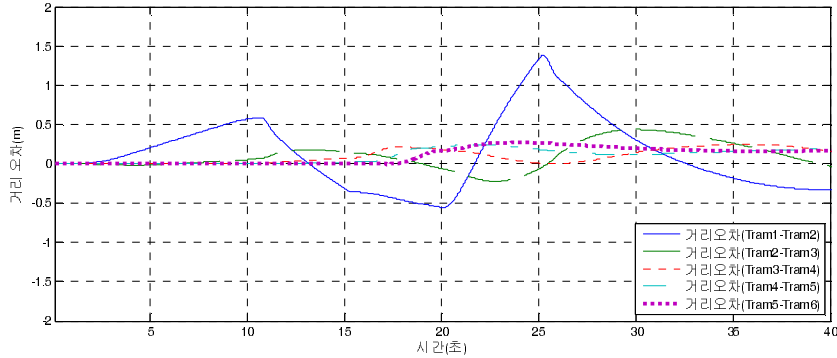


Fig. 6 Platoon system with vehicle inter-communication (time-spacing error)

4.2 군집주행 거리오차 비교

‘Fig.6’에서 차량간 통신이 적용된 군집주행의 경우 추종 트램쪽으로 갈수록 거리오차가 줄어드는 현상을 확인할 수 있다. 따라서 군집주행 전체의 안정성을 향상시킬 수 있다.

5. 결론

차간거리 자동제어 알고리즘에 기반한 군집주행 기술은 원래의 목적인 교통의 효율성 증가와 안정성 보장을 만족시키지 못하기 때문에 선두 트램의 속도 및 가속도 정보를 이용할 수 있는 차량간 통신이 적용되어야 한다. 본 논문에서는 바이모달 트램의 군집주행 재현을 위해 바이모달 트램의 재원과 역학적 특성을 고려하여 CarSim 을 통해 모델링하고 제어기를 설계하였다. 먼저 차량간 통신이 적용되지 않은 바이모달 트램 군집주행을 구현하고 성능 및 문제점을 분석하였다. 전방 트램의 속도 및 거리정보만으로는 군집주행 전체의 안정성을 보장할 수 없기 때문에 선두 트램의 속도 및 가속도 정보를 이용한 새로운 제어 알고리즘을 제안하였다. 그리고 6 대의 트램으로 구성된 군집주행 기동 시뮬레이션을 통해 제안된 제어기의 성능 및 안정성 향상을 확인하였다.

참고문헌

- [1] Hakgu Kim, Kyongsu Yi (2012) Design of a Model Reference Cruise Control Algorithm, SAE Int.J.Passeng.Cars-Electr.syst., Volume 5, Issue 2
- [2] Levine, W. and Athans, M. (1966) On the optimal error regulation of a string of moving vehicles, IEEE Trans. Automat. Contr., vol.11, no.3, pp.355-361
- [3] Liang, Chi-Yina and Peng, Huei, Optimal Adaptive Cruise Control with Guaranteed String stability, Vehicle system Dynamics, 31, pp.313-330