

## 바이모달 트램의 실시간 시뮬레이터 프로그램 개발

윤경한\*, 김영철\*\*, 이용상\*\*, 정해봉\*\*, 변윤섭\*\*\*  
국방과학연구소\*, 충북대\*\*, 한국철도기술연구원\*\*\*

### Development of Real-Time Simulator Program for Bimodal Tram

Kyong-Han Yun\*, Young-Chol Kim\*\*, Yong-Sang Lee\*\*, Hae-Bong Jung\*\*, Yeun-Sub Byun\*\*\*  
Agency for Defense Development\*, Chungbuk National University\*\*, KRRI\*\*\*

**Abstract** - 본 논문은 한국 철도기술연구원(KRRI)에서 개발 중인 바이모달 트램의 안내/추진/도킹 제어기 검증용 위해 제작중인 LabVIEW, PXI기반의 실시간 시뮬레이터를 위한 시뮬레이션 프로그램 개발에 대한 내용을 다루었다. 시뮬레이터 프로그램은 바이모달 트램의 비선형 동적모델, 위치추정필터, 안내/추진/도킹 제어기로 구성되며, 비선형 동적모델에는 실제 차량에서 제어기나 관측기에 사용되는 각종 측정값들을 모사하기 위한 센서 계측시스템이 포함된다.

로 이산적으로 주어지며, 위치추정알고리즘에서는 차량의 선형모델과 이산적으로 주어지는 측정값을 이용하여 차량의 위치를 실시간으로 계산하며, 이 값을 이용하여 차량과 기준경로 사이의 경로오차를 계산한다. 계산된 경로오차는 안내/추진/도킹제어기에 입력으로 사용되며, 조향제어기에서 계산된 조향명령, 추진제어기에서 계산된 토크가 다시 차량의 비선형 동역학 모델에 입력된다.

## 1. 서 론

한국 철도기술연구원(KRRI)에서 개발 중인 바이모달 트램은 버스를 2~3대 연결한 구조이고, 모든 바퀴가 조향되도록 설계되어 일반 도로를 마치 기차처럼 운행할 수 있는 차량이다. 이 차량은 운전자의 조작 없이 자동으로 주행할 수 있는 안내/추진제어 기능 및 정류장에서 정밀정차를 위한 도킹제어기능을 가지고 있다. 바이모달 트램의 주행특성 및 설계된 각종 제어기의 성능검증을 위한 수단으로 한국 철도기술연구원서 PXI기반의 실시간 시뮬레이터를 개발 중에 있으며, 본 논문에서는 시뮬레이터에 탑재될 시뮬레이션 프로그램의 개발에 대한 내용을 다루었다. PXI기반의 시뮬레이터 하드웨어는 바이모달 트램의 물리적인 특성을 모사하는 모의차량 시스템과 관측기 및 제어기로 구성되는 제어시스템으로 구성되며, 두 시스템을 PC환경에서 시뮬레이션 하기 위해 프로그램은 두 개의 분리된 루프로 구성된다.

## 2.2 모의차량 시스템

모의차량시스템에서는 식 (1)과 같이 주어지는 비선형 동역학 모델식 [2][5]을 적용하여 관성좌표계에서의 차량의 위치 및 자세정보를 계산하며, 세계계측시스템에서는 계산된 위치 및 자세정보를 이용하여 자이로, 굴절각센서, 휠엔코더에서 측정하는 값들을 모사한다. 조향각센서에서 측정되는 값은 센서잡음을 고려하지 않으므로 안내제어기에서 출력되는 값을 그대로 측정값으로 사용한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} &= \tau_{tire} \quad (1) \\ \tau_{tire} &= \sum_{i=1}^2 \{ \mathbf{L}_{long} \mathbf{R}_{wi}^{-1} \mathbf{T}_{dr,i} + \mathbf{L}_{lat,i} (\mathbf{R}_{wi}^{-1} \mathbf{D}(\mathbf{T}_{dr,i}) \delta_i + \mathbf{C}_i(\delta_i - \beta_{ti})) \} \\ \mathbf{q} &= [w_{x,c1} \quad w_{y,c1} \quad w_{\epsilon,c1} \quad w_{\epsilon,c2}]^T \end{aligned}$$

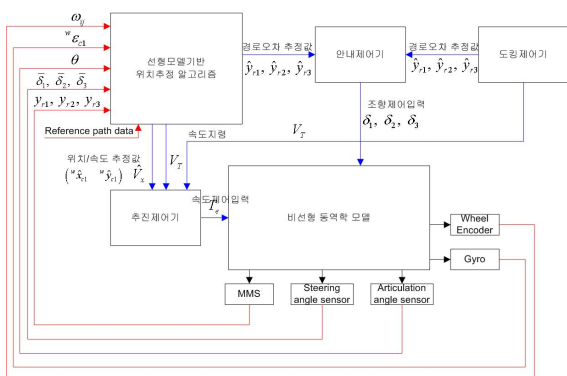
모의차량 시스템에서는 실제 차량의 센서계측시스템을 모사하기 위해 차량 동역학 모델로부터 계산된 각종 측정값들을 제어시스템으로 송신하는 구조를 가지고 있으며, 제어시스템은 이 값들을 이용하여 구한 제어입력을 모의차량 시스템으로 송신하는 구조를 가지고 있다.

구현된 시뮬레이션 프로그램에 모의주행경로를 입력하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 모의차량의 주행궤적 및 제어기에 포함된 위치정보추정필터의 출력, 모의차량과 주행경로사이의 경로오차 계산값들을 MATLAB으로 구현된 안내/추진 제어 설계용 Toolbox에서 계산된 결과와 비교/검토하여 성능을 평가하였다.

경로오차를 측정하는 MMS(Magnet Measurement System)는 기준경로 상에 4m 간격으로 매설된 자석표지로부터 측정되는 값을 이산적으로 출력하는 시스템이며, 시뮬레이션 프로그램에서는 식 (1)로부터 계산된 차량의 위치좌표를 이용하여 차량에 설치된 마그네트 센서의 위치좌표를 계산한 후 계산된 좌표와 자석표지의 위치좌표사이의 최단거리를 구하여 이 값을 경로오차 값으로 출력한다. 최단거리를 구하기 위한 검색 구간은 계산시간과 계산된 경로오차의 타당성을 검토하여 이전 스텝에서 구한 위치를 기준으로 전후 8포인트를 사용하였다. 이는 차량의 조향제어가 이루어지고 있다는 전제하에 경로오차가 일정값 이하로 유지되는 경우에만 가능하며, 제어기가 비정상적으로 작동하여 경로오차가 발생할 경우 계산값이 실제 측정값과 다르게 될 수 있다.

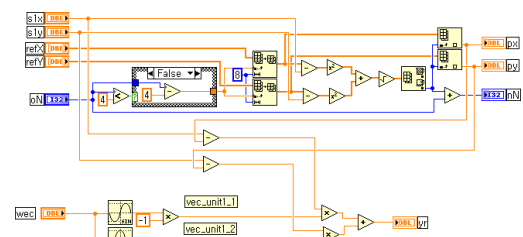
## 2. 시뮬레이션 프로그램

### 2.1 시뮬레이션 프로그램 구조



〈그림 1〉 시뮬레이션 프로그램 구조

시뮬레이션 프로그램의 기본구조는 그림 1과 같다. 차량의 비선형 동역학 모델에 포함된 센서계측시스템에서 모사된 측정값은 위치추정알고리즘의 입력으로 사용된다. 실제 차량에서 센서 측정값은 125ms 간격으로



〈그림 2〉 MMS의 LabVIEW 코드

그림 2에서 s1x, s1y는 차량에 설치된 마그네트센서의 좌표를 나타내며, refX, refY는 관성좌표계에서 기준경로의 x-축, y-축 좌표 배열이다. 경로오차의 출력값 yr은 차량이 기준경로 우측에 있을 경우 (+)값으로 출력되며, 좌측에 있을 경우 (-)로 출력된다.

## 2.3 제어시스템

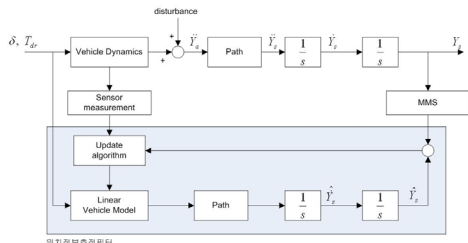
제어시스템은 위치추정알고리즘, 안내제어기, 추진제어기, 도킹제어기로 구성된다. 위치추정알고리즘은 바이모달 트램의 비선형 동역학 모델을 기준속도 7m/sec에서 선형화시킨 선형모델을 기반으로 구성되며, 센서 측정값을 이용하여 선형모델에서 계산된 차량의 위치오차를 보정해주는 역할을 한다. 오차보정에 사용되는 센서는 마그네트 센서, 자이로스코프, 조향각센서의 조합으로 구성되며, 마그네트센서 자석표지를 감지했을

때 측정된 정보로부터 식 (2)와 같이 위치좌표를 계산하여 선형모델의 상태변수를 보정하게 된다.

$${}^w x_{c1} = {}^w x_{m1} - y_{r1} \sin^w \epsilon_{m1} - l_{s1} \cos^w \epsilon_{c1} \quad (2)$$

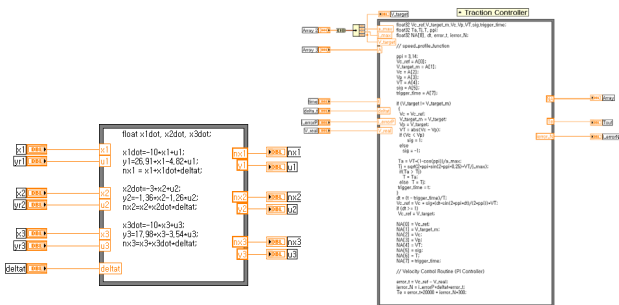
$${}^w y_{c1} = {}^w y_{m1} + y_{r1} \cos^w \epsilon_{m1} - l_{s1} \sin^w \epsilon_{c1}$$

그림 3은 위치추정 알고리즘의 블록도이다.[4]



〈그림 3〉 위치추정 알고리즘 블록도

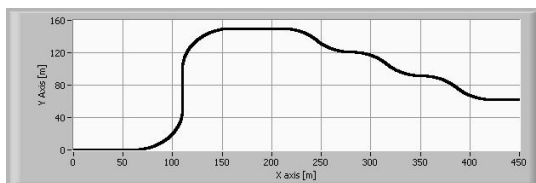
안내제어기는 3-input, 3-output의 MIMO 시스템에 대해 디커플러와 3개의 저차제어기로 설계되었으며, 추진제어기는 기준속도 프로파일을 추종하도록 하는 PI제어기로 설계되었다[6]. 설계된 제어기는 그림 4와 같이 LabVIEW에서 Pseudocode 형태로 구성되었다.



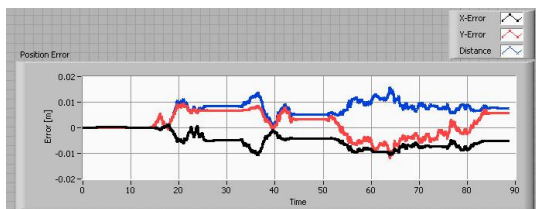
〈그림 4〉 안내/추진제어기 LabVIEW 코드

## 2.4 시뮬레이션

시뮬레이션은 바이모달 트램이 그림 5와 같은 기준경로를 주행하도록 수행하였다. 그림 6은 위치추정필터의 성능을 나타낸 것으로써, 비선형 동역학 모델에서 계산한 차량의 위치와 위치추정필터에서 계산한 위치의 오차를 나타낸 것이다. 추정오차는 그림에서 보는바와 같이 최대 2cm 정도로 나타났으며, 안내제어기가 10cm이내의 오차를 유지하도록 설계된다는 것을 고려할 때 비교적 양호한 값이라고 할 수 있다.



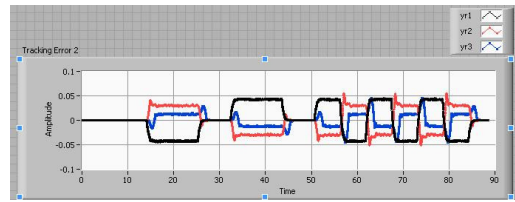
〈그림 5〉 안내/추진제어기 LabVIEW 코드



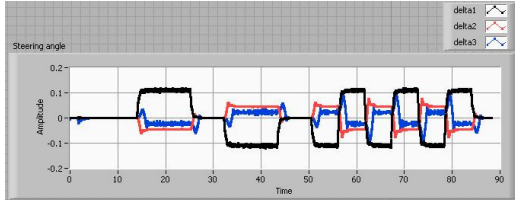
〈그림 6〉 위치추정필터 시뮬레이션 결과

그림 7은 위치추정필터에서 계산한 차량의 위치와 기준경로사이의 경로오차를 나타낸 것이며, 그림 8은 이때 안내제어기의 출력되는 조향지령을 나타낸 것이다. 실제 차량의 경로오차는 이 값과 그림 6에 나타낸 위치추정오차의 합으로써 나타나므로 최대 6~7cm 정도가 된다.

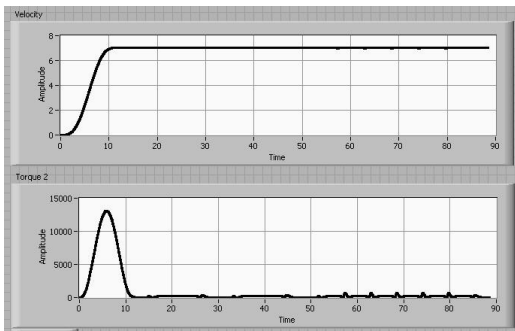
그림 9는 차량의 속도변화를 나타낸 것이다. 기준속도 7m/sec를 추종하도록 설계되었으며, 속도 변화 프로파일을 사인함수를 이용하였다.



〈그림 7〉 위치추정필터에서 계산한 경로오차



〈그림 8〉 안내제어기 출력



〈그림 9〉 추진제어기 성능  
(상 : 속도변화, 하 : 추진제어기 출력(토크) )

## 3. 결 론

시뮬레이터 프로그램에서 계산된 결과는 MATLAB에서 구현된 안내/추진 제어 설계용 Toolbox[6]에서 시뮬레이션한 결과와 비교하여 그 타당성을 검토하였다. 검토결과 전반적으로 양호한 성능을 보였다.

설계된 프로그램은 제어기나 위치추정필터의 성능향상을 위한 시뮬레이션 플랫폼으로 사용될 예정이며, 추후 PXI 실시간 시스템에 탑재하여 성능검증을 한 후 한국 철도기술연구원에서 현재 제작중인 바이모달 트램에 탑재하여 실험적인 검증을 실시할 예정이다.

## [참 고 문 헌]

- [1] C. Chen and M. Tomizuka, "Dynamic modeling of articulated vehicles for automated highway systems," Proc. of American Control conf., pp. 653-757, June 1995.
- [2] D. de Bruin and P.P.J. van den Boach, "Modeling and control of a double articulated vehicle with four steerable axles," Proc. of American Control Conf., pp/ 3250-3254, June 1999.
- [3] C. Chen and M. Tomizuka, "Dynamic modeling of tractor-Semitrailer vehicles in automated highway systems," PATH Technical Report, ITS, U. C. Berkeley, 1995.
- [4] 윤경환, 변윤섭, 민경득, 김영철, "도로상 자기시간 인식의 통한 주행차량 위치 추정", 정보및제어심포지움 논문집, pp. 308-309, 2009.
- [5] Y. C. Kim et al. 4, "Steering Control for Lateral Guidance of an all Wheel Steered Vehicle", Proc. of ICCAS 2008, pp. 24-29, 2008.
- [6] 민경득, 윤경환, 김영철, 변윤섭, "굴절차량의 안내/추진 제어 설계용 Toolbox", 전기학회 논문집, Vol. 57, No. 11, pp. 2074-2079, 2008.