

Development of a Matlab Toolbox for Guidance & Traction Control Designs of an Articulated Transportation Vehicle

閔庚得* · 尹慶漢** · 金永喆† · 邊允燮***

(Kyung-Deuk Min · Kyoung-Han Yun · Young Chol Kim · Yeun-Sub Byun)

Abstract - This paper presents a software toolbox with Matlab[®] developed for the various performance analysis of an automatic guidance system of the Bimodal Tram. The Bimodal Tram is a new kind of transportation vehicle which could be an all-wheel steered multiple-articulated vehicle. This vehicle has to be equipped with an automatic guidance, traction/braking, and docking system, In the stage of developing such a system, its validities and performances should be verified under various operation conditions. For the purpose of doing these things through simulation, this toolbox has been developed and demonstrated well by applying it to the KRRI model.

Key Words : Articulated transportation vehicle, Guidance control, Toolbox

1. 서 론

바이모달 트램(Bimodal Tram)은 버스와 열차의 장점을 살린 새로운 개념의 도시형 교통수단이다. 이 차량은 두 개의 버스형 객차가 연결된 굴절 형태이며 모든 차륜이 조향 가능한 구조이고 완전 자동으로 운행할 수 있는 기능을 갖도록 설계된다. 이러한 자동운전시스템은 차선을 따라 안전하게 주행하게 하는 안내제어 시스템, 운행 구간을 주어진 기준속도를 추종하게 하는 추진/제동제어 시스템, 정류장의 정차위치로 정밀하게 접근/정지하게 하는 도킹제어 시스템으로 구성된다. 안내제어는 그림 1과 같이 차량의 중앙에 4m간격으로 매설하게 되는 자석표지(magnetic marker)를 자기센서로 감지하여 차량의 위치정보를 추정하고, 차량의 3개 감지위치에서 횡 방향 편이량이 영이 되도록 각 축의 조향각을 제어하는 것을 말한다. 추진 제어는 차량의 현재 속도를 감지하여 차량의 위치에 따라 기 설정된 기준속도를 추종하도록 차량의 추진력 또는 제동력을 계산하는 것을 말한다. 정밀도킹제어(precise docking control)는 차량이 정류장에 접근하여 탑승위치에 정밀하게 정차하도록 횡/종방향 위치/속도/가속도 제어가 이루어지는 것을 말한다.

먼저 다양하고 불확실한 여러 가지 운전조건에 대해 안정성 신뢰성, 성능의 유지 등이 검증되어야 한다. 이러한 목적으로, 소프트웨어 검증도구나 HILS(hardware-in-the loop system)를 사용하게 된다.

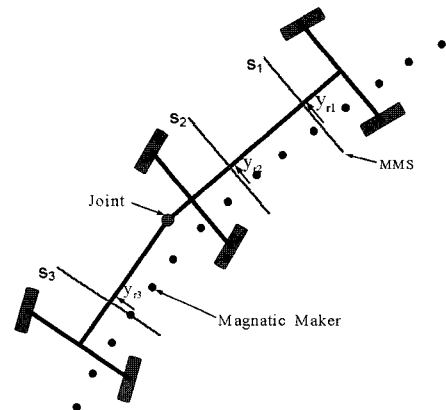


그림 1 자동안내제어 개념도

Fig. 1 A concept of an automatic guidance system

본 논문의 목적은 굴절차량의 안내/추진/도킹 제어기의 성능검증용 소프트웨어 도구를 개발하기 위해 고려한 기본 구성과 기능을 소개하고 개발된 결과물의 성능을 보이는데 있다. 소프트웨어 도구는 크게 다음 세 부분으로 구성된다.

- (i) 차량의 비선형 동역학 모델 (관성 좌표계, 차량중심 좌표계, 경로중심좌표계의 3가지 모델식이 적용됨)
- (ii) 3가지 제어기 (안내제어기, 추진/제동 제어기, 도킹 제어기)
- (iii) 외부기준입력 (기준경로, 경로에 따른 속도 프로파일, 도킹 모션 설정)

시뮬레이션을 통해 검증할 다양한 운전조건으로는 도로의 짐착계수 변동, 탑승객 수의 변동에 따른 하중변화, 횡 방향 강풍의 영향, 바퀴의 cornering stiffness 불확실성, 차량 제

† 교신저자, 正會員 : 忠北大學校 電子工學科 教授 · 工博
E-mail : yckim@cbu.ac.kr

* 學生會員 : 忠北大學校 電子工學科 碩士課程

** 正會員 : 國防科學研究所 先任研究員

*** 正會員 : 韓國鐵道技術研究院 先任研究員

接受日字 : 2008年 8月 20日

最終完了 : 2008年 9月 8日

원의 변동 등이 고려되었다. 각 제어기의 변동에 따른 감도를 검증할 수 있도록 제어기 이득을 독립적으로 재설정할 수 있게 하였으며 비선형 모델에 적용한 제어기 성능을 개선하기 위해 제어기의 파라미터를 튜닝 할 수도 있게 하였다. 각 동작조건에 따른 성능분석을 위해 오차, 조향각, 위치에 대한 정보를 그래픽으로 제공해주게 된다. 이 소프트웨어 도구는 Matlab® GUI 플랫폼으로 개발하였으며 개발된 도구를 한국철도기술연구원에서 개발 중인 바이모달 차량에 적용하여 만족스럽게 동작함을 보인다.

2. Toolbox의 주요구성요소

Toolbox는 그림 2에서 보는바와 같이 크게 세 부분으로 구성된다. (i) 차량의 비선형 동역학 모델, (ii) 외부기준입력, (iii) 3가지 제어기 (안내, 추진/제동, 도킹)

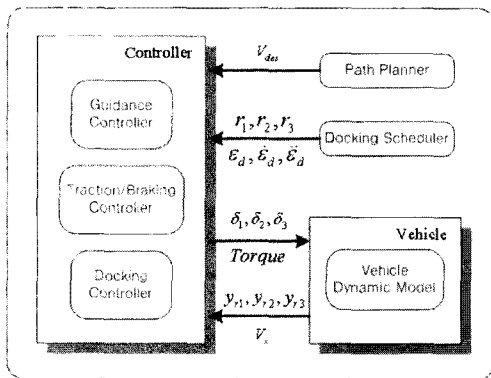


그림 2 Toolbox의 내부구성도
Fig. 2 Internal structure of the toolbox

먼저 차량의 비선형 동역학 모델은 3개의 조향각 입력과 토크입력에 따라 실제 차량에서 측정되듯이 기준경로와의 편차, 현재 운행속도를 출력한다. 외부 기준입력에는 기준경로의 절대좌표상의 위치, 기준속도 프로파일, 도킹모션 설정을 제어기 블록으로 입력시킨다. 마지막으로 제어기 블록에서는 외부 기준입력과 비선형 동역학 모델로부터 받은 횡방향 편이량 및 현재 차량속도를 통해 각 차축의 조향각과 추진/제동 토크를 계산하고 이를 다시 동역학 모델로 입력시킨다.

2.1 굴절차량의 비선형 동적모델

굴절차량의 동역학 및 제어기의 성능분석을 위해서는 먼저 굴절차량에 대한 동적모델이 수립되어야 한다. 이 동적 모델을 구하기 위해서는 적용 대상이 되는 굴절차량의 길이, 질량, 무게중심의 위치, 관성모멘트 등에 대한 구체적인 정보가 필요한데 본 논문에서는 KRRI 바이모달 트램의 재원을 기준으로 한 예를 보일 것이다. 그림 3의 바이모달 트램은 두개의 객차가 연결된 굴절구조로 개별적으로 조향이 가능한 3개의 축(Axle 1-3)을 갖고 있고 3개의 센서(S₁-S₃)로 기준경로와의 편차를 측정한다.

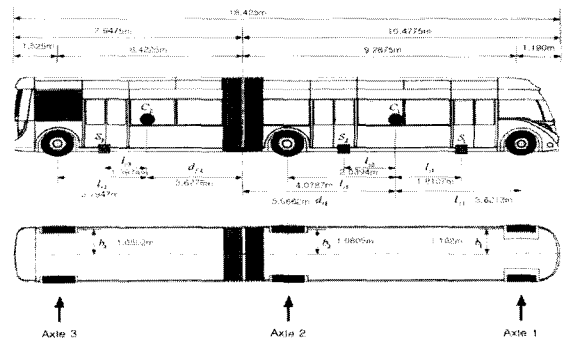


그림 3 KRRI 바이모달 트램의 형태 및 재원
Fig. 3 The KRRI all wheel steered single articulated vehicle

아래의 식 (1)은 Lagrange 방정식을 통해 얻은 굴절차량의 동역학 방정식이다[1,6].

$$M({}^w\mathbf{q})\ddot{{}^w\mathbf{q}} + C({}^w\dot{\mathbf{q}})({}^w\dot{\mathbf{q}}) = {}^w\boldsymbol{\tau} + {}^w\boldsymbol{\tau}_{dist} \quad (1)$$

여기서

$${}^w\mathbf{q} = [{}^w x_{w,c1} \quad {}^w y_{w,c1} \quad {}^w \epsilon_{c1} \quad {}^w \epsilon_{c2}]^T \quad (2)$$

$${}^w\boldsymbol{\tau} = \sum_{i=1}^2 [L_{xi} R_{wi}^{-1} T_{dri} + L_{xi} \{R_{wi}^{-1} D_{dri} \delta_i + C_i (\delta_i - \beta_{fi})\}] \quad (3)$$

$${}^w\boldsymbol{\tau}_{dist} = \frac{1}{2} \rho C_d A_F v_{wind,y}^2 \quad (4)$$

$M({}^w\mathbf{q})$: 차량의 질량과 관성모멘트

$C({}^w\dot{\mathbf{q}})({}^w\dot{\mathbf{q}})$: 원심력과 코리올리의 영향

${}^w\boldsymbol{\tau}$: 타이어에 의해 차량에 가해지는 힘의 총합으로 평면상에서 첫 번째 객차 및 두 번째 객차의 위치벡터와 일반화된 위치벡터의 Jacobian행렬을 이용하여 구해진다.

${}^w\boldsymbol{\tau}_{dist}$: 차량의 횡 방향으로 불어오는 바람에 의한 힘

2.2 디커플링 제어 시스템

굴절차량의 횡 방향 동역학 모델은 3입력 3출력 시스템이다. 식 (5)의 RGA 해석을 통해 각 입력과 출력의 결합된 정도를 해석하였다.

$$A = G(0) \times G(0)^{-T} = \begin{bmatrix} 1.0000 & -1.0000 & 1.1835 \times 10^{-15} \\ -1.7210 & 1.7210 & -5.1017 \times 10^{-16} \\ 7.2095 \times 10^{-1} & -7.2095 \times 10^{-1} & -8.8617 \times 10^{-16} \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 $G(s)$ 는 차량의 횡 방향 동적 모델을 3x3의 전달 함수 형태로 표현한 것이다. RGA 해석결과 조향 입력 δ_1, δ_2 는 기준경로와의 편차 출력 y_{r1}, y_{r2} 와 강하게 결합되어 있고, δ_3 가 y_{r1}, y_{r2} 에 미치는 영향은 매우 작음을 알 수 있다. 그림 4는 강하게 결합되어있는 2x2시스템(입력: δ_1, δ_2 , 출력: y_{r1}, y_{r2})을 분리하기 위해 고려한 디커플링제어 시스템의 블록선도이다[3]. $G_{ij}(s)$ 는 플랜트 전달함수이고 D_{12}, D_{21} 는 디커플링 보상기이다.

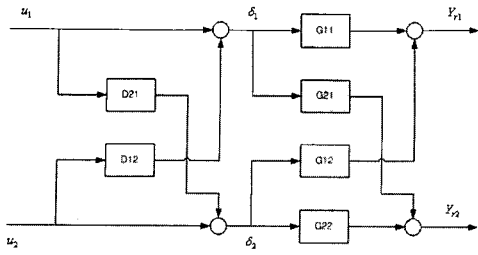


그림 4 디커플링제어 시스템의 블록선도
Fig. 4 Block diagram of decoupling control system

2.3 추진/제동제어 시스템

횡방향 안내제어기 설계를 위해 바이모달 트램의 비선형 동적모델을 7m/s의 속도에서 선형화하여 선형 동적모델을 유도하였다[2,3,8,9]. 이 선형 모델을 바탕으로 그림 5와 같이 분산제어기 구조의 안내제어기를 설계하였다. 여기서 안내제어기 C_1, C_2, C_3 는 승차감과 안정성을 고려하여 횡방향 페루프 대역폭이 1.2Hz를 초과하지 않는 저차 제어기로 설계하였다[4]. 여기서 B는 그림 4에서 보인 디커플링 제어기이다.

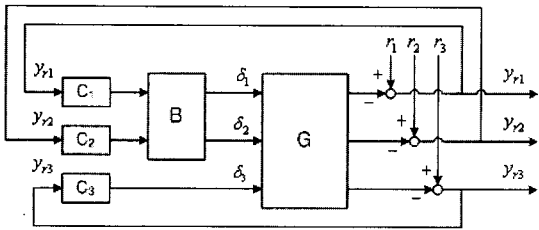


그림 5 굴절차량의 안내제어를 위한 분산제어 시스템
Fig. 5 Decentralized control configuration for the lateral guidance of vehicle

2.4 추진/제동제어 시스템

추진/제동제어 시스템에는 슬라이딩 모드 제어기를 적용하였다. 차량의 종방향 속도 V_x 를 상태변수 X 로 하면 동적 모델 시스템에 대한 기준모델은 식 (6)와 같고, 슬라이딩 평면을 식 (7)과 같이 정의할 경우 추진/제동 제어기는 식 (10)과 같이 구해진다[5].

$$\begin{aligned} X_m'(t) &= A_m X(t) + B_m U(t) \\ A_m < 0, \quad B_m &= -A_m \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} S_B(t) &= e(t) + \beta \int_0^t e(\tau) d\tau - e(0), \quad \beta = B_m \\ e(t) &= X_m(t) - X(t) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} U_{ea}(t) &= B_m^{-1} [-\beta(A_m + \beta) \int_0^t e(\tau) d\tau + (A_m + \beta)e(0) \\ &+ (A_m - A_{pn})X(t) + B_m U_m(t)] \end{aligned} \quad (8)$$

$$U_s(t) = B_m^{-1} [K_a S_B(t) + K_b \text{sgn}(S_B(t))] \quad \begin{cases} K_a > A_m + \beta \\ K_b > |W(t)| \end{cases} \quad (9)$$

$$U(t) = U_{ea}(t) + U_s(t) \quad (10)$$

- $e(t)$: 차량의 종방향 기준속도와 현재속도와의 속도오차
- $S_B(t)$: 슬라이딩 평면
- $U(t)$: 추진/제동제어기 출력

2.5 정밀도킹제어 시스템

정밀도킹제어는 차량이 정류장에 접근하여 탑승위치에 정밀하게 정차하도록 횡/종방향 위치/속도/가속도 제어기가 이루어지는 것을 말한다. 기본적으로 안내제어기를 통해 횡방향 경로를 추종하도록 하였으며, crab way 방식으로 3축의 기준 조향각을 동일한 방향으로 제어하게 된다. 종방향 정밀 정차를 위해 그림 6의 비선형 피드백 선형화제어기 + 선형 위치/속도 제어기 구조를 적용하였다.

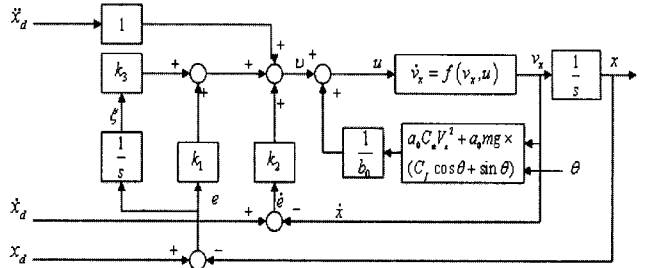


그림 6 종방향 정밀도킹 제어시스템의 블록선도
Fig. 6 Block diagram of the precise docking control system

그림 7은 도킹제어시 종방향 위치/속도/가속도에 해당하는 기준 입력신호이다. 도킹 시작점의 속도는 5 m/s이고, 정차지점까지 거리는 23 m, 정차위치 까지 도착시간은 9.2 sec로 고려하였다.

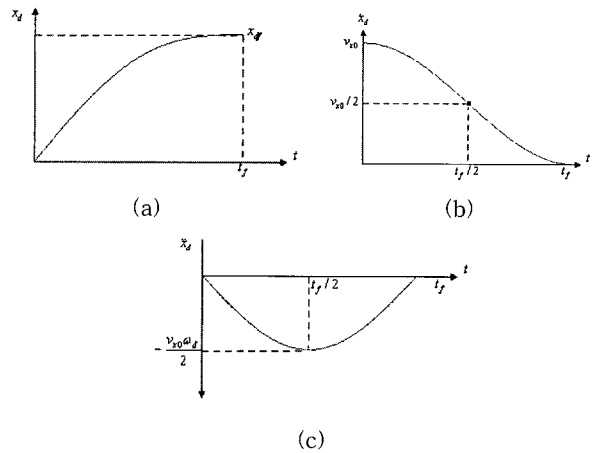


그림 7 종방향 도킹 제어를 위한 위치/속도/가속도 기준프로파일 (a) 위치기준입력, (b) 속도기준입력, (c)가속도 기준입력
Fig. 7 Reference profile of location/velocity/acceleration for the docking control

3. Toolbox의 구조 및 기능

그림 8은 Toolbox의 주 화면이다. 주 화면은 7개의 패널로 이루어져 있다.

- ① 차량 재원 및 시뮬레이션 조건 입력패널(종/횡방향 바람, 도로면의 점착계수, 차량의 속도 등),
- ② 제어기 이득 입력패널(안내제어기 C_1, C_2, C_3 와 디커플러의 이득입력),
- ③ 성능출력패널 (횡방향 최대 오차, 종방향 속도 오차, 횡방향

최대가속), ④ 차량의 움직임을 동영상으로 보여주는 동영상 출력패널, ⑤ 시뮬레이션 결과를 그래프로 보여주는 그래프 출력패널, ⑥ 그래프 출력창에 보여질 정보를 선택할 수 있는 그래프 선택패널, ⑦ 시뮬레이션 실행버튼패널
 각 부분 명칭 및 기능을 표 1에 보인다.

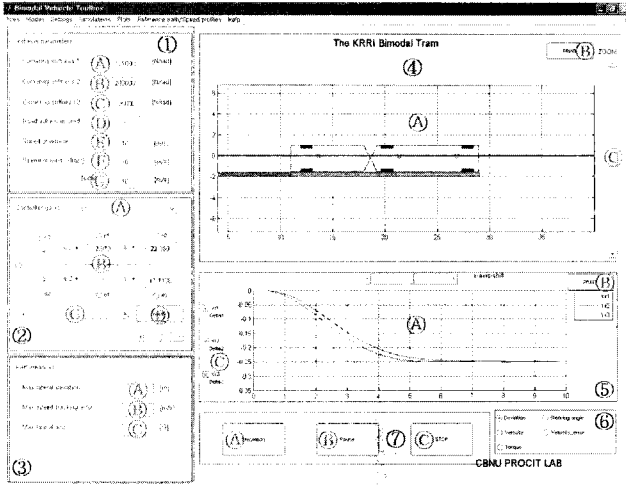


그림 8 Toolbox의 주 화면
 Fig. 8 The main screen of the toolbox

표 1 Toolbox의 입출력 인터페이스
 Table 1 The main user interface

패널 번호	패널의 용도	각 부분의 명칭
①	차량 제원 및 시뮬레이션 조건 입력 패널	(A) Cornering stiffness coefficient 1 (B) Cornering stiffness coefficient 2 (C) Cornering stiffness coefficient 3 (D) 도로의 점착계수 (E) 차량의 속도 (Guidance control mode) (F) 차량의 종방향 바람의 속도 (G) 차량의 횡방향 바람의 속도
②	제어기 입력 패널	(A) 제어기의 선택 (C1, C2, C3, D12) (B) 제어기 이득값 (C) 제어기 이득값 조정 슬라이더 바 (D) 제어기 이득값 초기화
③	성능 출력 패널	(A) 기준경로와의 횡방향 최대오차 (B) 기준속도와의 최대오차 (C) 횡방향 최대가속도
④	동영상 출력 패널	(A) 동영상 출력창 (B) 동영상 창 프린트 (C) 동영상 줌인 슬라이더
⑤	그래프 출력 패널	(A) 각종 그래프 출력창 (B) 그래프 창 프린트 (C) yr1, yr2, yr3 선택
⑥	그래프 선택버튼	(횡방향 편차, 조향각, 조향각속도, 속도, 추진토크)
⑦	실행버튼	(A) 시뮬레이션 시작 버튼 (B) 시뮬레이션 일시정지 버튼 (C) 시뮬레이션 종료 버튼

4. Toolbox의 KRRI 바이모달 트램 적용 예

Toolbox의 주요 기능인 동역학거동 테스트, 디커플링제어 검증, 안내제어 검증, 도킹제어 검증과정을 KRRI 바이모달 트램에 적용함으로써 Toolbox의 성능을 입증하고자 한다.

4.1 동역학 테스트

제어기를 적용하지 않고 임의의 조향입력에 따른 차량의 운동을 개루프로 테스트하는 모드이다. 그림 9는 직선의 기준경로에서 조향입력 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ 중 δ_2 를 선택하여 정현파를 입력하였을 때의 시뮬레이션 결과이다. 두 개의 파형은 각각 S_1, S_2 에서 측정된 기준경로와의 편차(y_{r1}, y_{r2})이다.

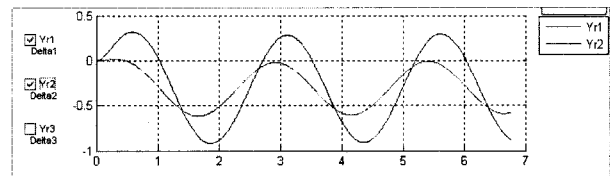


그림 9 동역학 테스트 결과
 Fig. 9 Simulation results of the vehicle dynamics test when a sinusoidal input δ_2 is applied to the vehicle model

4.2 디커플링 제어 검증

디커플러 D_{12} 는 δ_2 가 y_{r1} 에 미치는 영향을 상쇄시키기 위해 설계된 것이다. 비선형 동역학 모델에 D_{12} 를 적용한 결과를 그림 10에 보였다.

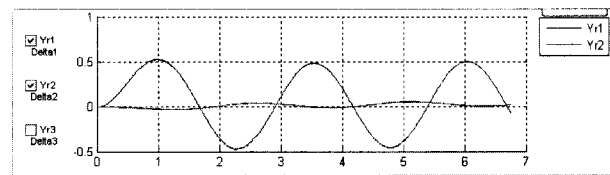


그림 10 디커플링 제어 시뮬레이션 결과
 Fig. 10 Simulation results of decoupling effect with D_{12} when a sinusoidal input δ_2 is applied to the vehicle model

그림 9와 그림 10은 모두 δ_2 를 동일하게 조향했을 때의 결과를 보인 것 이지만 그림 10에서는 D_{12} 에 의해 δ_2 과 y_{r1} 의 결합이 거의 분리된 응답을 보이고 있음을 알 수 있다.

4.3 안내제어 검증

안내제어 검증을 위한 기준경로는 실제 도로상의 경로를 입력하여 수행할 수 있으나 본 논문에서는 곡률에 따른 안내제어기의 성능을 검증하기 위해 임의로 생성한 경로를 기준으로 한 결과를 보인다. 그림 11과 같은 형태로 그 곡률은 3가지로 경우로 나누어진다. V_{max} 는 횡방향 최대허용 가속에 의해 계산된 각 곡률에서의 최대 속도이다.

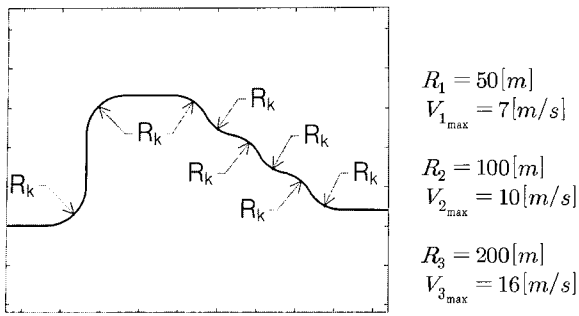


그림 11 안내제어 검증을 위한 기준경로 : 세 가지 곡률의 기준경로 생성

Fig. 11 Shape of reference path : there are three pairs of curvature radii and speeds.

그림 12는 기준경로의 반경을 50m, 차량의 속도를 7m/s로 하였을 때 안내제어 시뮬레이션 결과이다. (a)는 패널④를 통해 실시간으로 차량이 경로를 추종하는 과정을 보여주며, (b)는 패널⑤에서 나타나는 횡방향 추종오차와 조향각(제어기 출력)을 보인 것이다.

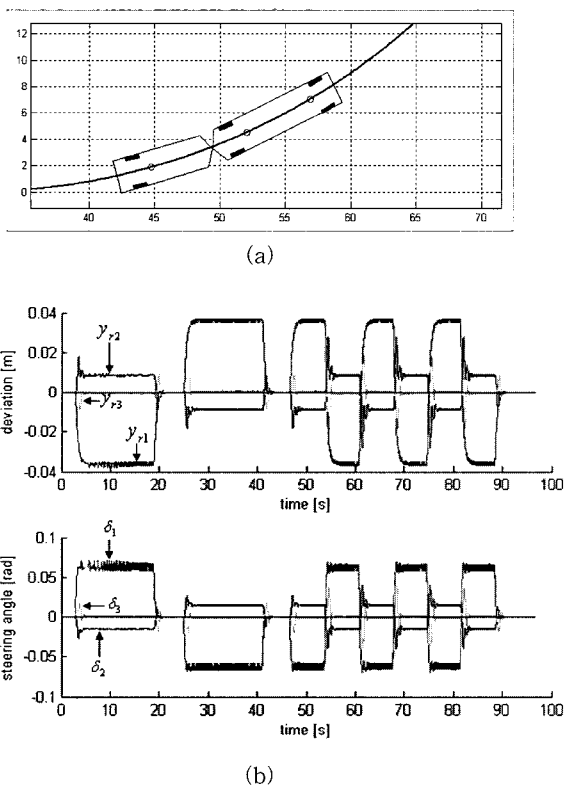


그림 12 안내제어 시뮬레이션 결과 : (a) 안내제어 시뮬레이션 동영상, (b) 횡방향 편차 및 조향각

Fig. 12 Simulation results of guidance control : (a) animation of guidance control simulation, (b) tracking errors and steering angles.

안내제어기의 성능은 곡률뿐만 아니라 도로의 점착계수, 차량의 무게, cornering stiffness coefficient, 횡풍의 변화에 따른 성능도 분석되어야 한다. 그림 13은 그중의 한가지로

직선 기준경로를 16m/s로 주행중인 굴절차량에 횡풍이 가해졌을 때의 시뮬레이션 결과이다. 이때 횡풍은 최대 40m/s 속도로 0.05-0.5Hz의 주기를 갖는 Chirp신호로 하였다.

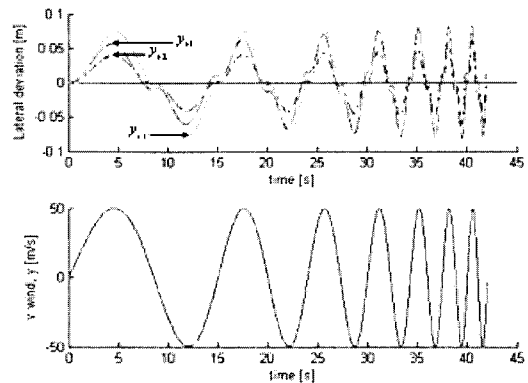


그림 13 최대 40m/s 횡풍에서의 횡방향 편차

Fig. 13 Simulation results : (a) tracking error and (b) chirp signal as a strong wind disturbance of the max. speed of 40m/s

시뮬레이션 결과 강한 태풍의 풍속에 해당하는 횡풍에도 8cm 이내의 횡방향 편차를 보이고 있다.

4.4 도킹제어 검증

도킹제어는 정차 23m 전방에서 5m/s의 속도로 진입하여 정류장에 정확히 정차하는 것을 기준으로 하였다.

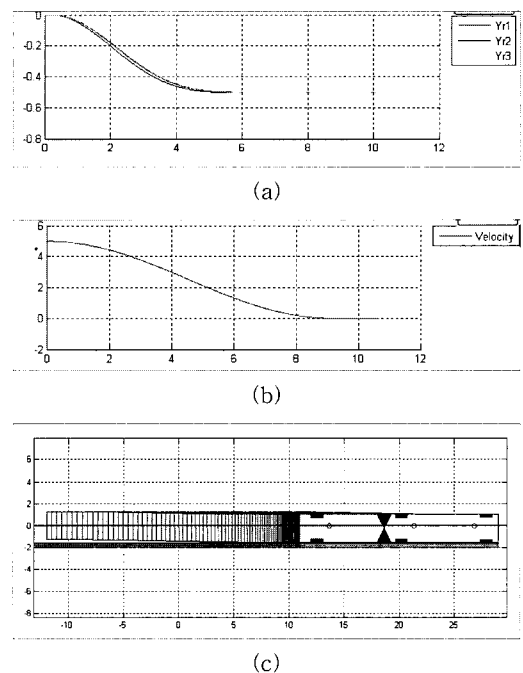


그림 14 도킹제어 시뮬레이션 결과

Fig. 14 Simulation results of precise docking control

그림 14는 도킹모드 시뮬레이션 결과이다. (a)는 차량의 횡 방향 편이를 나타낸 것이다. 3개 센서에서의 편차가 모

두 동일하게 변화하는 것은 차량이 승강장과 평행하게 접근하고 있음을 보인다. (b)는 차량이 종방향 속도로 최초 5m/s에서 점차 감소하다가 9.2초에 완전히 정차하고 있음을 보여준다. (c)의 도킹 동영상상을 통해 차량이 crab way 방식으로 승강장과 평행하게 접근하여 정확한 위치에 정차하는 것을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 굴절차량의 안내/추진/도킹 제어기 성능검증을 위해 개발한 소프트웨어 도구의 기본 구성과 기능을 소개하고 개발된 결과물의 성능을 보였다.

Toolbox에서 검증할 다양한 운전조건으로는 도로의 점착 계수 변동, 탑승객 수의 변동에 따른 하중변화, 횡 방향 강풍의 영향, 바퀴의 cornering stiffness coefficient 불확실성, 차량 재원의 변동 등이 고려되었다. 각 동작조건에 따른 성능분석을 위해 오차, 조향각, 위치에 대한 정보를 그래픽으로 보여주었다. 개발된 Toolbox를 KRRI 바이모달 트램의 모델에 적용하여 만족하게 동작함을 보임으로서 Toolbox의 성능을 입증하였다.

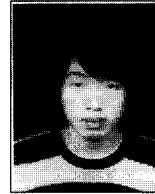
감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 2008년도 위탁과제(과제명 : 굴절차량의 자동 안내/추진제어 기술 개발)의 지원으로 수행된 결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] Y.C. Kim et al. 3, "A Lateral Dynamic Model of an All Wheel Steered Bimodal Vehicle," *Proc. of ICCAS 2007*, Seoul Korea, 2007.
- [2] Y.C. Kim et al. 3, "A Linear Model of Lateral Dynamics of the KRRI All Wheel Steered Vehicle," *Proc. of ICS*, pp. 230-231, Seoul, Korea, 2008.
- [3] 김영철, "굴절차량용 자동안내제어 알고리즘 개발," 한국철도기술연구원, 국가교통핵심기술개발사업 연구보고서, 2008.
- [4] Lihua Jin and Y.C. Kim, "Fixed, Low-Order Controller Design with Time Response Specifications using Non-Convex Optimization," to be published in *the ISA Transaction*. 2008.
- [5] Y.S. Byun et al. 3, "Longitudinal Control of Bimodal tram using Sliding Mode Control," *Proc. of ICCAS 2008*, Seoul, Korea, 2008.
- [6] D. de Bruin and P.P.J. Bosch, "Modeling and control of a double articulated vehicle with four steerabel axles," *Proc. of American Control Conf.*, pp.3250-3254, San Diego, USA, June 1999.
- [7] R. Rajamani, *Vehicle Dynamics and Control*, Springer, 2006.
- [8] Meihua Tai and Masayoshi Tomizuka, "Robust Lateral Control of Heavy Duty Vehicles" California PATH Research Report UCB-ITS-PRR-2003-24.
- [9] Chieh Chen and Masayoshi Tomizuka, "Lateral Control of Commercial Heavy Vehicles" *Vehicle System Dynamics*, v.33 no.6, pp. 291-420, 2000.

저 자 소 개



민 경 득 (閔 庚 得)

1981년 5월 7일생. 2007년 충북대 전자공학과 졸업. 2007년~현재 동 대학원 제어계측공학과 석사과정.

Tel : 043-273-3968

Fax : 043-272-2475

E-mail : min_k_d@cbnu.ac.kr



윤 경 한 (尹 慶 漢)

1968년 5월 22일생. 1991년 충북대 전자공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1993년~현재 국방과학연구소 선임연구원.

Tel : 042-821-2885

Fax : 042-821-2390

E-mail : 3313776@hanafos.com



김 영 철 (金 永 喆)

1981년 고려대학교 전기공학과(공학사), 1983년 서울대학교 전기공학과(공학석사), 1987년 서울대학교 전기공학과(공학박사),

1988년~현재 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부 교수. 1992년~1993년 미국 Texas A&M Univ. Post-Doctoral Fellow. 2001년~2002년 미국 Vandervilt Univ./Tennessee State Univ. 방문교수. 대한전기학회 제어계측연구회장.

Tel : 043-261-2475

Fax : 043-272-2475

E-mail : yckim@cnu.ac.kr



변 윤 섭 (邊 允 燮)

1967년 8월 17일생. 1994년 2월 대전산업대학교 전자공학과(공학사). 1996년 충북대학교 전자공학과(공학석사). 1996년~현재 한국철도기술연구원 선임연구원

Tel : 031-460-5437

Fax : 031-460-5024

E-mail : ysbyun@krri.re.kr