

바이모달 트램의 후진주차보조 알고리즘 개발에 관한 연구

최 성 훈¹⁾ · 박 태 원²⁾ · 이 수 호¹⁾ · 문 경 호³⁾

아주대학교 기계공학부¹⁾ · 아주대학교 기계공학과²⁾ · 한국철도기술연구원³⁾

A Study on Developing Reverse Parking Assistant Algorithm for Bi-modal Tram

Seonghoon Choi¹⁾ · Taewon Park²⁾ · Sooho Lee¹⁾ · Kyeongho Moon³⁾

¹⁾Division of Mechanical Engineering, Ajou University, Gyeonggi 443-749, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Ajou University, Gyeonggi 443-749, Korea

³⁾Korea Railroad Research Institute, 360-1 Woram-dong, Uiwang-si, Gyeonggi 437-757, Korea

(Received 10 February 2009 / Accepted 8 May 2009)

Abstract : The bi-modal tram is under development as a new public transportation. The features of the tram are an extended wheel base and its length. This features result in difficulties for drivers on maneuvering the tram. Therefore, the all wheel steering system is applied to the articulated vehicle. The AWS system enables the vehicle to steer all the rear wheels independently and improves its driving characteristics. However, the bi-modal tram has a problem to move backward in the limited place because of its geometric feature and the AWS system. Hence, the reverse parking assistant algorithm for articulated vehicle is developed to solve the problems of the reverse parking. Using the vehicle model which includes the reverse parking assistant algorithm, the dynamic analysis is performed for several parking cases. By the result of the analysis, the stability and validity of the reverse parking assistant algorithm is verified.

Key words : Bi-modal tram(바이모달트램), All-wheel steering system(전차륜 조향 시스템), Reverse parking assistant (후진주차보조)

Nomenclature

α : articulation angle
 δ_1 : average steering angle of 1st axle
 δ_2 : average steering angle of 2nd axle
 δ_3 : average steering angle of 3rd axle
 W_1 : distance between 1st and 2nd axles, mm
 W_2 : distance between 2nd and 3rd axles, mm
 P_1 : distance between virtual rigid axle of front carriage and 2nd axle, mm
 P_2 : distance between virtual rigid axle of rear

carriage and 3rd axle, mm

K : distance between 2nd axle and articulation point, mm

A : distance between front carriage and turn center, mm

B : distance between rear carriage and turn center, mm

1. 서론

바이모달 트램은 저공해 동력원으로 더 많은 인원을 더욱 편리하고 보다 정확한 시간 내에 운송할 수 있도록 개발 중인 차세대 운송 수단이다. 노약자, 장애인 등의 교통 약자가 쉽게 오르내릴 수 있도록 차체 높이를 낮춘 저상 구조를 가지고 있으며, 이를 위해 각 축에 더블 위시본 형식의 독립현가장치를

*Corresponding author, E-mail: park@ajou.ac.kr

적용하였다. 또한, 대량의 인원 수송을 위해 차량의 전장과 축거를 확장하고 복수의 차체를 연결함으로써 증가하는 차량 최소 회전 반경과 후륜 이탈 궤적을 감소시키면서, 복잡한 도심에서 차량을 정밀 제어하기 위하여, 각 차륜을 독립적으로 조향하는 All-Wheel-Steering(AWS) 시스템을 활용한다.^{1,2)} 향후 바이모달 트램은 현재 운영 중인 버스 등의 대량 운송 수단을 대체하고 지하철과 함께 도시의 주요 운송 수단의 한 축으로 활약할 것으로 예상된다.

바이모달 트램이 운용될 환경은 기존의 굴절 버스가 운용된 환경을 통해 예측할 수 있다. 여기서 예상되는 대표적인 문제점은 굴절 버스의 주차 문제이다. 후방 주차 시 2-Wheel-Steering(2WS)을 적용할 경우 일반 굴절버스나 트랙터-트레일러와 유사한 성능을 나타내므로 주차에 어려움이 발생하게 된다. 트레일러의 특성으로 인해 후진 선회를 위한 여유 공간이 필요할 뿐만 아니라, 일반 버스보다 확장 설계된 축거로 인하여 추가로 선회 반경 특성에 있어서 불리하다. 현재 서울 시내에서 운행 중인 굴절 버스들은 보통 주차 및 정비 등의 목적으로 차량 후진을 활용한다. 차량 선회 시 충분한 여유 공간이 확보되는 대규모 차고지에서는 차량을 후진시킬 경우가 드물지만, 서울 시내의 대부분의 차고지, 검차지는 그 규모가 크게 작으므로 좁은 공간에서 차량의 선회를 위하여 차량을 후진시키는 경우가 자주 발생한다. 따라서 현재 개발 중인 바이모달 트램 또한 추후 실제 운용될 때에 차고지, 검차지 등에서 차량의 후진이 자주 요구될 것으로 예상된다.

위와 같은 요인으로 인하여 바이모달 트램은 후진 주차를 위한 보조 조향 알고리즘의 적용을 필요로 한다. 본 보조 알고리즘의 적용으로 트랙터-트레

일러의 후진과 같은 추가적인 조작 없이도 운전자는 차량을 후진할 때에 보다 용이하게 차량을 제어할 수 있을 뿐만 아니라, 운용 환경의 공간적인 제약이 줄어들게 된다.

바이모달 트램과 같은 트랙터-트레일러 차량의 후진주차보조 또는 자동주차 시스템과 관련된 연구 동향은 다음과 같다.

C. Lundquist, W. Reinelt, O. Enqvist는 트레일러가 장착된 차량의 후진을 위한 능동 조향제어 알고리즘을 제시하였다.³⁾ 비숙련 운전자의 조향 입력을 능동 조향제어 장치가 자동적으로 수정하고 원하는 장소로 차량을 조향한다. D. Zöbel은 트랙터-트레일러 구조의 차량의 무인 후진 주행 제어를 위하여 주행 궤적을 설정하고 각 구간별로 차량의 전륜 조향각을 제어하였으며,⁴⁾ E. Balcerak, T. Weidenfeller와 공동 연구를 통해 최소한의 거리를 이동하여 주차하도록 차량을 제어하는 반자동 주차 보조 시스템 개발하였다.⁵⁾ A. Kiyuna, H. Kinjo, K. Nakazono는 다 차량 로봇의 후진을 위해 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)으로 개발한 뉴로 제어기(Neuro-controller)를 이용하여 로봇의 거동을 안정적으로 제어하였다.⁶⁾

트랙터-트레일러 구조의 차량이 선회 시 발생하는 이탈 궤적을 줄이기 위해 C. Altafini는 다수의 차체가 연결된 로봇 구조에서 전륜 조향각의 피드백 제어를 통하여 후륜 차축들의 이탈 궤적을 감소시켰다.^{7,8)} S. Manesis, T. Koussoulas, G. Davrazos는 미끄럼식 킹핀 시스템(slide kingpin system)을 이용하여 다 차체 굴절 차량 각각의 굴절점 위치를 제어함으로써 선회 시 발생하는 이탈궤적을 획기적으로 감소시켰다.⁹⁾

자동 주차 알고리즘은 주로 일반 차량을 대상으로 연구되고 있다. T. Inoue, Minh Q. Dao, K. Liu는 차량의 수학적 모델을 개발하고, 주차 여러 단계로 세분화하였다. 평행 주차 및 T형 주차의 이상적인 궤적을 제시하고 이를 먼저 추종하도록 차량을 제어한 후, 정밀주차 알고리즘을 적용하였다.¹⁰⁾ 이종호, 양주용, 윤대중은 Motor-Driven Power Steering(MDPS) 기반의 차량에서 영상센서를 이용하여 주차공간을 인식하고 주차궤적을 산출하는 알고리즘

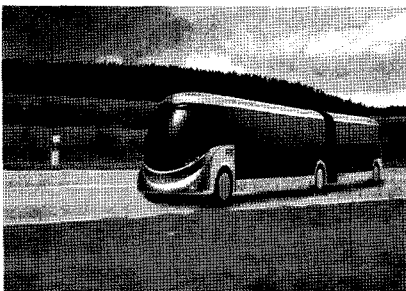


Fig. 1 Bi-modal tram

제시하였다.¹¹⁾ 박정술, 한민홍은 카메라 영상 통한 평면 지도를 생성하여 차량의 최적 이동 경로를 생성하는 지능형 주차지원 시스템을 개발하였다.¹²⁾

이러한 연구 동향 중, AWS 시스템이 적용된 차량의 자동 주차, 주차 보조 시스템 또는 이탈 제적의 제어에 관한 연구는 많지 않으며, 트랙터-트레일러 구조의 차량의 경우, AWS 시스템이 적용된 사례에 대하여 수행된 연구는 최근 개발 중인 바이모달 트램과 관련된 연구 결과를 발표한 논문들이 거의 유일하다. 본 논문에서는 저상 굴절 차량의 후진주차 보조 알고리즘을 개발하고, 후진 제어 조향각 산출식을 유도하며 차량 동역학 모델을 이용하여 이를 검증한다.

2. 바이모달 트램의 AWS 시스템

Fig. 2는 바이모달 트램의 AWS 시스템의 개략도이다. 바이모달 트램의 축거는 일반 굴절 버스나 시내버스보다 약 2~2.3m 정도 길다. 이는 차량의 회전 반경을 커지게 하는 요인이 된다. 따라서 차량을 1량과 2량으로 나누어 차체가 굴절되도록 함과 동시에 All-Wheel-Steering system(AWS)을 적용하여, 굴절 궤도 차량의 회전 반경과 이탈 제적 폭을 줄인

다.¹³⁾ 바이모달 트램의 전 차륜 조향 시스템은 차량 속도, 전륜 조향각, 굴절각 등의 차량 주행 정보를 센서를 통해 수집한다. 수집된 정보는 후륜의 조향 제어 ECU에 입력되고 전차륜 조향 알고리즘을 토대로 2, 3축 차륜의 조향각이 유압 시스템과 조향 링크 장치를 통해 제어된다.

3. 후진주차보조 알고리즘 개발

3.1 후진주차 이상궤적설정

일반적인 주차보조 시스템은 차량이 후진할 때에 에커만 각에 의해 일정 반경을 선회할 수 있다는 가정 하에서 이상적인 주차 궤적에 수렴하도록 조향각을 제어한다. 이러한 이상궤적은 다수의 원과 그 원에 접하는 직선들을 조합하여 설정될 수 있다. 따라서 차량이 반경 R을 선회할 수 있다면 후진 주차 시에 차량이 Fig. 3과 같은 이상적인 궤적에 수렴하는 것이 가능하다.¹⁴⁾

위와 같이 일반 차량에 적용되는 바를 바이모달 트램에 확장하여 후진주차보조 알고리즘을 통해 직선을 따라 주행하다 반경 R을 선회할 수 있도록 제어한다면 바이모달 트램 또한 이상궤적에 수렴한다고 할 수 있다.

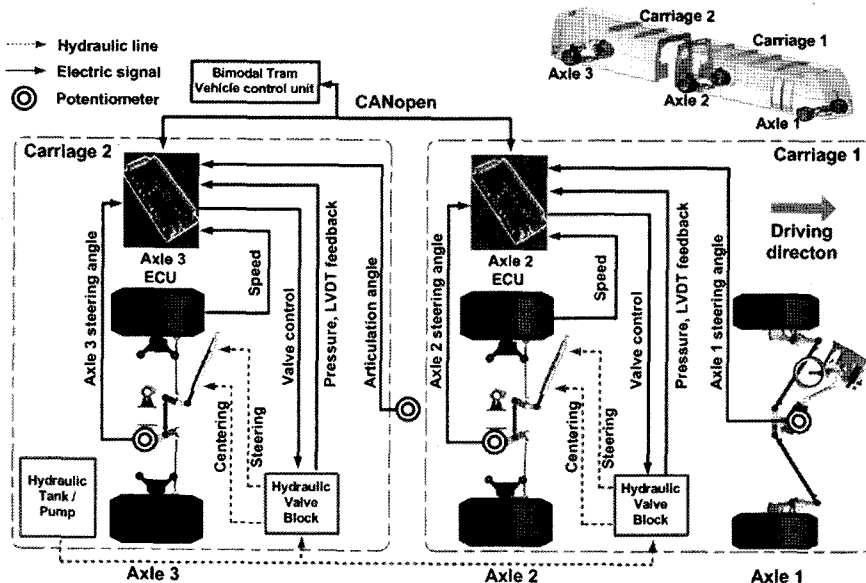


Fig. 2 AWS system of bi-modal tram

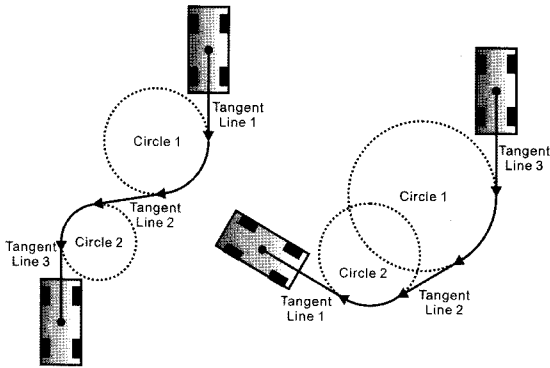


Fig. 3 Ideal path establishment using circles and tangent lines

후진 주차 시 이상궤적 설정이 필요한 대표적인 상황을 크게 두 가지로 설정하였다. 첫 번째는 일정 반경을 후진 선회하는 단순 선회 주차 상황과 두 번째로 T자형의 공간에서 진행 방향과 수직한 방향으로 차량을 주차하는 상황이다.

3.1.1 단순선회주차 이상궤적설정

Fig. 4와 같은 단순선회를 위해서는 도로를 따라 직진하다 차량의 조향각을 일정하게 유지한 채 선회하여 목표한 위치로 주차한다.

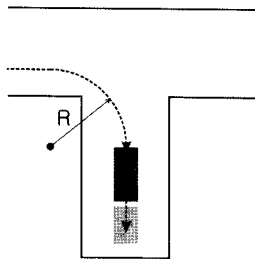


Fig. 4 Ideal path for simple turning

3.1.2 T형 주차 이상궤적설정

T형 주차는 앞서 설정한 단순 선회 주차를 응용한다. 차량이 주차 공간의 반대편까지 반경 R_1 의 원을 따라 전진한 후, Fig. 5에서 두 원이 접하는 점에서 전진을 멈추고 반경 R_2 의 원호를 따라 후진한다. 차량의 최종 위치가 적절하지 않을 경우, 전진과 후진을 반복하여 차량을 주차한다.

3.2 후진주차보조 알고리즘 구성

바이모달 트램의 후진주차보조 알고리즘은 Fig. 6

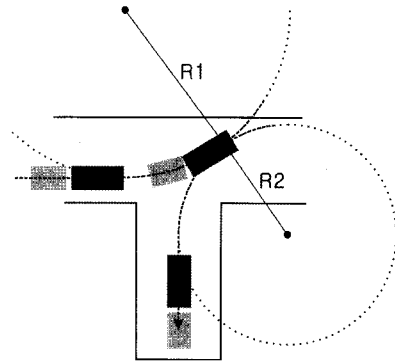


Fig. 5 Ideal path for row parking

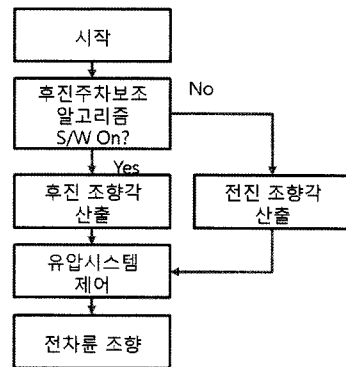


Fig. 6 Reverse parking assistant algorithm of bi-modal tram

과 같이 정의한다. 평상시에는 기존의 전진 조향 알고리즘에 따라 전 차량이 조향된다. 운전자의 필요에 의해 후진주차보조 알고리즘 스위치가 활성화될 경우, 후진 조향각 산출식에 따라 계산된 후륜 조향각으로 유압 시스템이 제어된다. 후진주차보조 알고리즘으로 인해 바이모달 트램은 안정적인 주차가 가능하게 된다.

3.3 후륜 조향각 산출식의 유도

3.3.1 가상 선회 중심점의 설정

후륜 조향각을 산출하기 위해 Fig. 7과 같은 자전거 모델을 구성하고 바이모달 트램이 정상원을 선회하도록 P_1, P_2 의 값에 따라 가상 고정축을 위치시켜 두 축이 서로 만나는 위치를 가상의 선회 중심점으로 설정한다.¹⁵⁾ 가상 고정축 설정 시, 1축의 최대 조향각에 비해 2, 3축의 최대 조향각이 약 절반가량 조작되는 기구학적인 한계를 고려하였다.

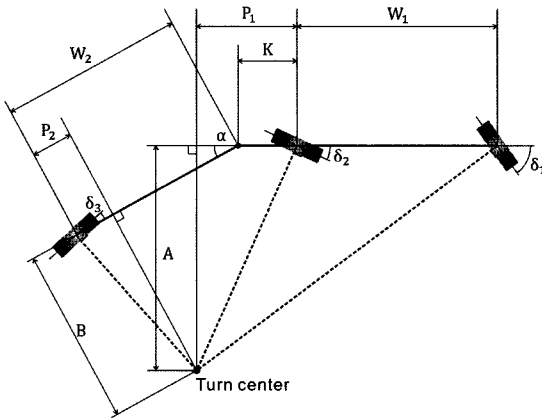


Fig. 7 Bicycle model of bi-modal tram

3.3.2 축 조향각의 유도

Fig. 8은 2축 조향각을 산출하기 위해 바이모달 트램의 전방 차체 부분만을 나타낸 것이다. 1축과 2축의 조향각은 각각 선분 A와 P_1, W_1 를 이용하여 식 (1)과 (2)로 나타낼 수 있다.

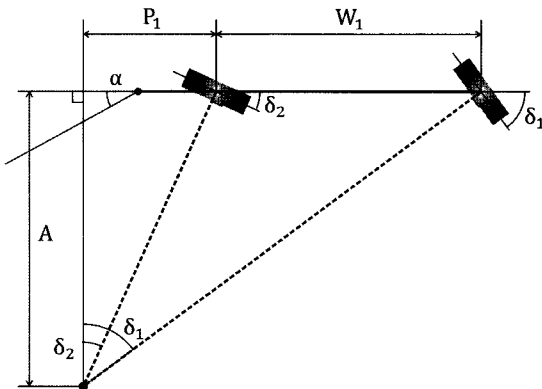


Fig. 8 Bicycle model for deriving steering angle of 2nd axle of bi-modal tram

$$\tan \delta_1 = \frac{P_1 + W_1}{A}, \quad \tan \delta_2 = \frac{P_1}{A} \quad (1)$$

$$\frac{P_1 + W_1}{\tan \delta_1} = \frac{P_1}{\tan \delta_2} \quad (2)$$

이를 통해 2축 조향각 산출식을 식 (3)과 같이 유도할 수 있다.

$$\delta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{P_1 \tan \delta_1}{P_1 + W_1} \right) \quad (3)$$

3.3.3 3축 조향각의 유도

식 (1)과 마찬가지로 3축의 조향각은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\tan \delta_3 = \frac{P_2}{B} \quad (4)$$

Fig. 8에서 굵게 표시한 삼각형을 기준으로 굴절각에 대해 수학적인 관계를 식 (5)와 같이 정리하고 식 (4)와 (5)를 통해 식 (6)을 얻는다.

$$\tan \alpha = \frac{W_2 - P_2 - \frac{(P_1 - K)}{\cos \alpha}}{B} \quad (5)$$

$$\frac{W_2 - P_2 - \frac{(P_1 - K)}{\cos \alpha}}{\tan \alpha} = \frac{P_2}{\tan \delta_3} \quad (6)$$

식 (6)을 정리해 유도한 3축 조향각 산출식은 식 (7)과 같다.

$$\delta_3 = \tan^{-1} \left(\frac{P_2 \tan \alpha}{W_2 - P_2 - \frac{(P_1 - K)}{\cos \alpha}} \right) \quad (7)$$

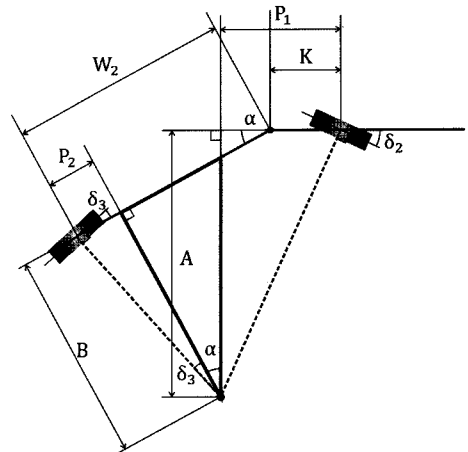


Fig. 8 Bicycle model for deriving steering angle of 3rd axle of bi-modal tram

4. 바이모달 트램의 동역학 모델링

바이모달 트램의 동역학 모델링 및 해석에는 상용 동역학 해석 툴인 MSC. ADAMS를 사용하였다.¹⁶⁾ 차량 각부의 제원은 설계 도면을 이용하였다. 실차

량과 동일한 현가, 조향 시스템을 구성하였고, 타이어와 노면간의 특성 또한 고려하였다. 현가 시스템은 이상화된 스프링-댐퍼로 모델링 하였다. 굴절부의 경우에도 마찬가지로 실차량과 동일하게 구성하고 설계 한계치 이상으로는 차량이 굴절되지 않도록 설정하였다. 이렇게 구성된 차량 동역학 모델에 후진주차보조 알고리즘을 적용하여 유압 실린더의 변위 입력을 통해 각 차륜이 조향되게 하였다.

5. 바이모달 트랙의 후진주차 해석

후진주차보조 알고리즘을 적용한 바이모달 트랙의 주행 안정성을 검증하기 위하여 동역학 해석을 수행하였다.

5.1 단순선회주차 해석

본 해석에서의 최대 전륜 조향 입력각은 32.2° 이며, 일정 반경의 선회를 위하여 조향각을 유지하다가 차량이 정차할 무렵 조향각을 감소시킨다. 차량 속도는 10km/h 로 설정하였다.

Fig. 9를 통해 단순 선회주차 시의 각 축 조향각 및 굴절각의 변화와 관계를 알 수 있다. 후진 조향각 산출식에 따라 2축 조향각은 1축 조향각에 의해, 3축 조향각은 굴절각에 의해 제어되고 있는 것을 볼 수 있다. 1축의 최대 조향각에 근접하는 32.2° 의 조향 입력에 의하여 3축 조향각의 최대 조향각 17.5° 에 근접하는 각도로 조향됨을 볼 수 있다. Fig. 10은 이때의 차량 궤적을 보여준다.

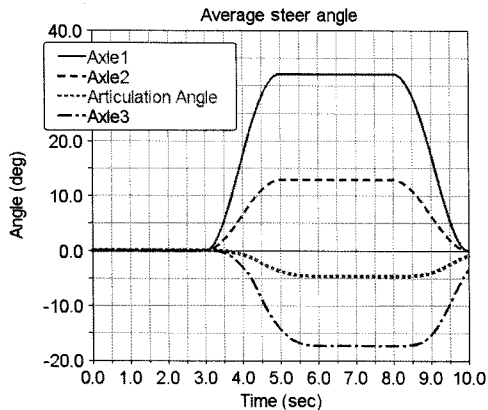


Fig. 9 Average steering angle and articulation angle of simple backward turning

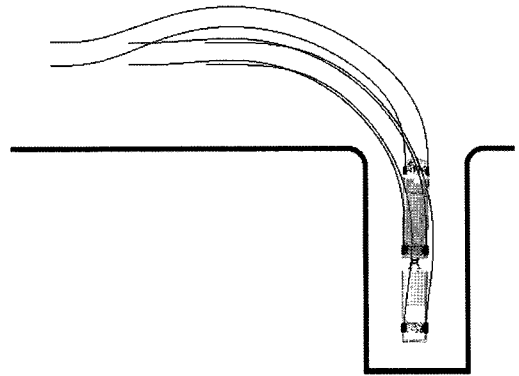


Fig. 10 Trace of simple backward turning

5.2 T형 주차 해석

T형 주차를 위한 이상궤적은 반경 $R1$ 을 따라 전진하다 정지한 후 반경 $R2$ 로 후진하는 것이다. 이를 차량 모델로 구현하였다. 주행 속도는 10km/h 이다.

Fig. 11은 T형 주차 해석의 각 축 조향각 및 굴절각 변화를 보여준다. 전진 시 2축 조향각은 1축 조향각에 의하여 제어되며 그 위상은 반대이나, 차량 후진 시 후진주차보조 알고리즘을 활성화시켜 2축 조향각은 1축 조향각에 동위상으로 조향됨을 알 수 있다. 3축 조향각은 굴절각에 의해 제어된다. 차량은 12~14초 구간에서 정지한다. 이 때 후진주차보조 알고리즘의 활성화에 의해 3축 조향각은 굴절각에 의해 산출된 값으로 제어되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 12는 T형 주차 시 차량 궤적을 보여준다. 전, 후진 시 각기 다른 반경으로 선회하여 이상주차궤적에 따라 차량이 주행함을 알 수 있다.

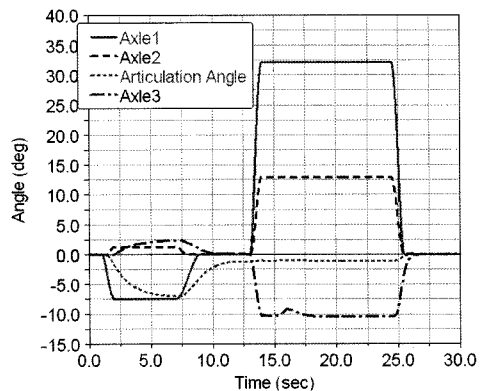


Fig. 11 Average steering angle and articulation angle of row parking

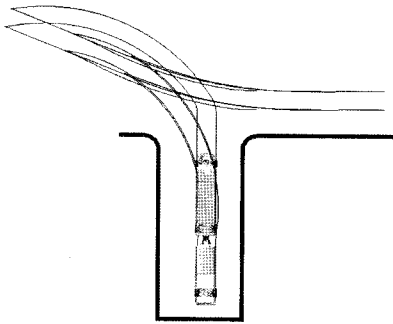


Fig. 12 Average steering angle and articulation angle of row parking

6. 결론

- 1) 바이모달 트램의 후진주차 어려움을 해결하기 위하여 후진주차보조 알고리즘을 개발하였다.
- 2) 안정적인 주차를 위한 차량이 수렴할 이상 궤적을 설정하고 바이모달 트램에 확장 적용하였다.
- 3) 바이모달 트램의 자전거 모델을 통하여 후진 시의 후륜 조향각 산출식을 유도하였다.
- 4) 후진주차보조 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 차량 동역학 모델을 구성하고 주행 해석을 수행하여 차량의 안정성과 실용성을 검증하였다.

후 기

본 연구는 국토해양부의 교통체계효율화 사업의 지원으로 수행되었습니다. 지원에 감사드립니다.

References

- 1) J.-K. Mok, J.-H. Lim and S.-H. Cho, "Technical Development of Bi-modal Low-bed Articulated Vehicle Using New Energy," *Journal of the KSME*, Vol.45, No.12, pp.46-49, 2005.
- 2) K.-H. Moon, J.-K. Mok, S. Chang and W.-S. Park, "Application of All-wheel Steering System to Articulated Vehicles," *Transactions of the Korean Society for Railway* 2006 Spring Annual Meeting, pp.1-6, 2006.
- 3) C. Lundquist, W. Reinelt and O. Enqvist, "Back Driving Assistant for Passenger Cars with Trailer," *SAE*, 2006.
- 4) D. Zöbel, "Trajectory Segmentation for the Autonomous Control of Backward Motion for Truck and Trailer," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.4, No.2, pp.59-66, 2003.
- 5) D. Zöbel, E. Balcerak and T. Weidenfeller, "Minimum Parking Maneuvers for Articulated Vehicles with One-Axle Trailers," *ICARCV*, 2006.
- 6) A. Kiyuna, H. Kinjo and K. Nakazono, "Backward Control of Multi-trailer Systems Using Neuro-controllers Evolved by a Genetic Algorithm," *ISAROB*, 2004.
- 7) C. Altafini, "Path Following with Reduced Off-tracking for Multibody Wheeled Vehicles," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol.11, No.4, pp.598-605, 2003.
- 8) C. Altafini and P.-O. Gutman, "Path Following with Reduced Off-Tracking for the n-Trailer System," *Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision & Control*, 1998.
- 9) S. Manesis, N. T. Koussoulas and G. N. Davrazos, "On the Suppression of Off-tracking in Multi-articulated Vehicles through a Movable Junction Technique," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol.37, pp.339-414, 2003.
- 10) T. Inoue, M. Q. Dao and K.-. Liu, "Development of An Auto-Parking System with Physical Limitations," *SICE Annual Conference in Sapporo*, 2004.
- 11) J. Lee, J. Yang and D. Yoon, "The Development of Parking Assist Algorithm," *Spring Conference, KSAE*, pp.2105-2109, 2007.
- 12) C.-S. Park and M.-H. Han, "Implementation of an Intelligent Automatic Parking Assist System," *Journal of KISPS*, Vol.6, No.4, pp.182-190, 2005.
- 13) S. H. Lee, K. H. Moon, T. W. Park and Y. H. Jeon, "A Study on the Dynamic Characteristics of the Bi-modal Tram with All-Wheel-Steering System," *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol.10, No.4, pp.438-443, 2007.
- 14) K. Lee, D. Kim, W. Chung, H. W. Chang and P. Yoon, "Car Parking Control Using a Trajectory Tracking Controller," *SICE-ICASE International Joint Conference*, 2006.
- 15) *ADAMS 2003 User Manual*, MSC. Software Corporation, USA, 2003.
- 16) T. D. Gillespie, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, SAE, USA, 1992.