

저상굴절버스 조향시스템 전자제어장치의 테스트플랫폼 구축에 관한 연구

A Study on a Test Platform for AWS (All-Wheel-Steering) ECU (Electronic Control Unit) of the Bi-modal Tram

이수호* 문경호** 박태원*** 김기정**** 최성훈* 김영모**
Lee, Soo-Ho Moon, Kyeong-Ho Park, Tae-Won Kim, Ki-Jung Choi, Sung-Hun Kim, Young-Mo

ABSTRACT

In the development process of an ECU (Electrical Control Unit), numerous tests are necessary to evaluate the performance and control algorithm. The vehicle based test is expensive and requires long time. Also, it is difficult to guarantee the safety of the test driver. To overcome the various problems faced in the development process, the ECU test has been done using HIL (Hardware In the Loop). The HIL environment has the actual hardware including an ECU and a virtual vehicle model. In this paper, the test platform environment is developed for the AWS ECU black box test. The test platform is built on HIL (Hardware In the Loop) architecture. Using the developed test platform, the control algorithm of the AWS ECU can be evaluated under the virtual driving condition of the bi-modal tram. Driving conditions, such as a front steering angle and vehicle velocity, are defined through the PC (Personal Computer) input. Input signals are transformed to electrical signals in the PC. These signals become the input conditions of the AWS ECU. The AWS ECU is stimulated by arbitrary input conditions, and responses of the system are observed.

1. INTRODUCTION

일반적으로 차량의 조향 방식은 2WS(2-wheel steering), 4WS(4-wheel steering), AWS (All-wheel steering)로 분류된다. 대부분의 차량은 전륜 2WS 조향 방식을 채택하고 있고, 일부 차량에서 4WS 조향 방식이 적용되고 있다. 4WS 에서의 후륜은 저속에서 차량의 조작성 향상을 위해 역위상, 고속에서 안정성 향상을 위해 동위상으로 조향된다. [1]

저상 굴절 버스는 굴절 차체를 가지고 있고 3축으로 구성되어있다. 저상 굴절 버스는 3축이 모두 조향되는 AWS 시스템을 사용하고 있다. AWS 시스템은 긴 축거를 가진 버스, 트럭에 일부 사용되고 있다.[2](Duane, 1995) AWS 시스템의 후륜은 저속에서 역위상으로 조향되고, 고속에서는 조향되지 않는다. 저속에서의 후륜조향은 굴절 차량의 선회 반경과 궤적 폭(lane width)을 줄여준다. [3] AWS 시스템에 의한 작은 선회 반경과 좁은 궤적 폭은 저상 굴절 버스의 도심내 안전한 주행에 도움을 준다. AWS 시스템은 ECU, 유압 액츄에이터, 조향 링크로 구성되어 있다. 차량 주행 상황(운전자 조향각, 차속, 굴절각)에 따라 ECU는 유압 액츄에이터를 제어한다. 유압 액츄에이터에 의해 구동되는 조향 링크에 따라 저상 굴절 버스의 후륜이 조향된다. 차량의 안전을 위해 AWS 시스템에 대한 검증 과정이 필요하다.

* 정회원, 아주대학교 기계공학과 대학원

E-mail : ssonaudo@empal.com

TEL : (031)219-2952 FAX : (031)219-1965

** 한국철도기술연구원

*** 아주대학교 기계공학과

**** 아주대학교 정보통신대학원 전자공학과

차량용 전자제어 장치의 평가를 위한 실차 시험은 많은 시간과 비용이 필요하다. 그러나 HIL 시뮬레이터를 이용하면 전자 제어 시스템에 대한 효율적이고, 경제적인 시험이 가능하다. ABS(Anti-lock Brake System), ESP(Electronic Stability Program), TCS (Traction Control System), EPS (Electronic Power Steering)와 같은 차량용 전자제어 시스템의 개발 과정에서 HIL 시뮬레이터를 이용하여 제어알고리즘을 검증하고 있다. [4, 5, 6, 7]

본 논문에서는 AWS ECU의 성능을 평가할 수 있는 HIL 환경의 테스트 플랫폼을 구성하였다. 테스트 플랫폼을 이용하여 AWS ECU에 대한 Black box 테스트를 수행하였고, 테스트 결과 분석을 통해 AWS 시스템을 검증하였다. 또한 AWS 시스템을 장착한 저상 굴절 버스의 거동 분석을 위해 동역학 모델을 구성하였다. 개발된 차량 동역학 모델에는 AWS 제어 알고리즘을 적용하였고, 해석 결과는 실차 시험과 비교 검증되었다.

2. CONCEPT OF THE AWS SYSTEM IN THE BI-MODAL TRAM

저상 굴절 버스의 전차륜 조향을 위해 2축과 3축은 각각 1축 조향각, 굴절각에 의해 조향된다. 저속에서 후륜은 전륜과 반대 방향(Negative mode)으로 조향된다. 전 차륜 조향을 위한 2, 3축의 조향각은 Figure 1과 같은 저상 굴절 버스의 자전거 모델로부터 계산된다. 그러나 고속에서는 저상 굴절 버스의 주행 안정을 위해 후륜은 조향되지 않는다.

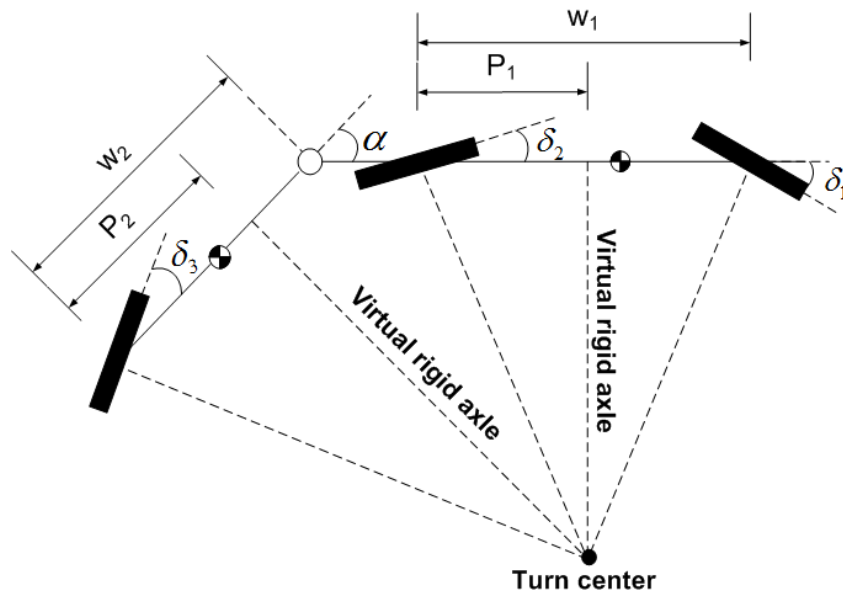


Fig. 1 Bicycle model of the Bi-modal Tram

2WS에서 차량의 선회 중심은 고정축(후륜축) 상에 존재하게 된다.[8] AWS 시스템과 같이 후륜이 조향되는 차량의 선회 중심은 가상고정축 상에 존재한다. 저상 굴절 버스의 선회중심은 전, 후 차체에 각각 존재하는 가상 고정축의 교점이 된다. 2, 3축의 조향각은 식(1)과 (2)에 의해 계산된다.

조향각 계산을 위한 파라메타 값은 Table 1과 같다.

Table 1. Bi-modal Tram Specification

Variable	Description	Value (mm)
α	Articulation angle	–
δ_1	Axle1 steering angle	–
δ_2	Axle2 steering angle	–
δ_3	Axle3 steering angle	–
w_1	Wheel base between axle 1 and axle 2	7700
w_2	Distance between axle 3 and articulation point	6385
P_1	Distance between body1 virtual rigid axle and axle2	2300
P_2	Distance between body2 virtual rigid axle and axle3	2000

$$\delta_2 = -\tan^{-1}\left(\frac{P_1 \times \tan\delta_1}{w_1 - P_1}\right) \text{-----(1)}$$

$$\delta_3 = -\tan^{-1}\left(\frac{P_2 \times \tan\alpha}{w_2 - P_2}\right) \text{-----(2)}$$

3. AWS ECU TEST

3.1 Test Platform Set up

저상 굴절 버스에는 전차륜 조향을 위해 2축, 3축에 하나씩 두 개의 AWS ECU를 가지고 있다. AWS ECU 테스트는 2축과 3축의 ECU에 대해 개별적으로 수행된다. HIL 환경의 AWS ECU 테스트 플랫폼은 Figure 2와 같이 구성되어 있다. 테스트 플랫폼은 구조는 ECU, 유압 시스템을 포함하는 하드웨어 부와 입력 신호 입력을 위한 소프트웨어 부로 나뉘어져 있다.

테스트 플랫폼의 하드웨어는 AWS ECU와 유압 시스템을 포함하고 있다. 물론 테스트 플랫폼에 사용되는 모든 하드웨어는 저상 굴절 버스에 사용되고 있는 부품들로 구성되어 있다. 유압 시스템은 탱크, 펌프, 펌프 구동을 위한 모터, 유압 액추에이터 그리고 제어 밸브 블럭으로 구성되어 있다. 차량의 조향 장치로서 피트만 암(Pitman Arm)과 타이로드(Tie rod)를 포함하고 있다.

테스트 플랫폼의 소프트웨어는 AWS ECU에 대한 입력 신호를 생성하고, 하드웨어의 센서 신호들을 인식하는 역할을 한다. AWS ECU의 작동을 위해 실차에서 발생하는 CANopen 신호, 속도 신호, 전륜 각/굴절각 센서신호, 그리고 디지털 신호들을 생성시켜 줘야한다. CANopen 신호의 경우 CAN king 프로그램을 이용해 생성된 가상의 신호는 PC와 RS-232로 연결된 Kvaser[9] 장치를 이용해서 AWS ECU로 입력된다. 차량 속도는 속도 생성 프로그램(Emulator)과 DAQ board를 거쳐 차속에 따라 주파수가 변하는 사각파로 ECU에 입력된다. 소프트웨어에 의해 생성된 전륜 조향각 (또는 굴절각)은 DAQ board를 거쳐 ECU에 아날로그 신호로 입력된다. 그리고 AWS ECU의 정상작동을 위한 디지털 신호들 (Ignition on, door close, AWS mode, System ready signal)이 ECU에 입력된다. Figure 3은 완성된 AWS ECU 테스트 플랫폼을 보여주고 있다.

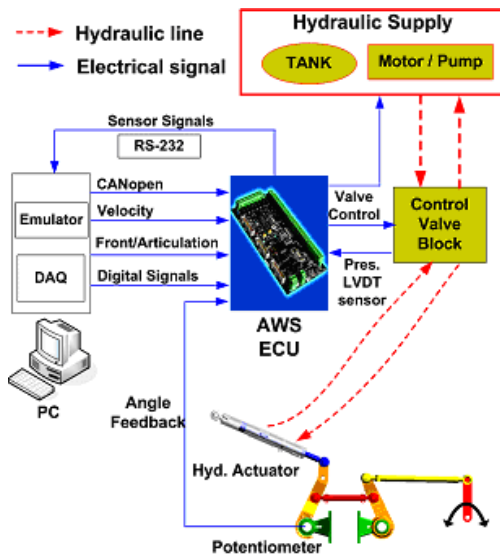


Fig. 2 AWS ECU Test Platform Schematic

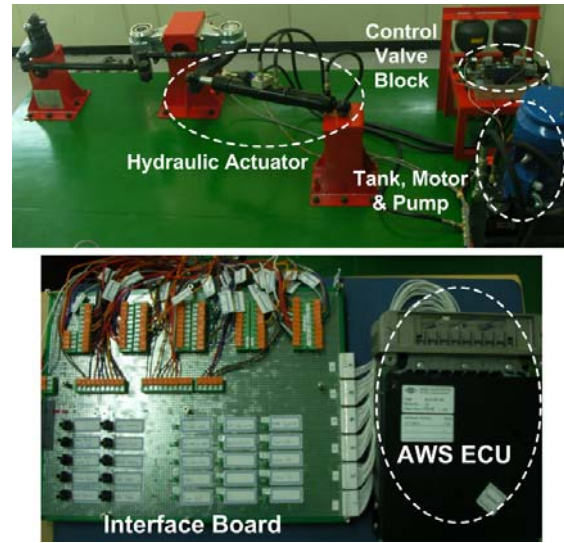


Fig. 3 AWS ECU Test Platform

3.2 Test Method for the AWS ECU

AWS 시스템에 대한 테스트는 차량의 주행과 선회 상황을 ECU에 입력 신호로 부여하여 수행하였다. 차량의 속도는 0~80km/h까지 1km/h의 단위로 입력된다. 2축 ECU에는 전륜 조향각이 입력되고, 3축 ECU에는 굴절각이 입력된다. 전륜 조향각은 $0 \sim \pm 35^\circ$, 굴절각은 $0 \sim \pm 43^\circ$ 범위에서 입력된다. 차속 신호와 전륜 조향각 (또는 굴절각) 신호를 제외한 다른 입력 신호들은 시스템의 정상 작동을 위한 조건으로 입력 시켰다. 차속과 전륜 조향각 (또는 굴절각)을 다양한 조건으로 변화 시키며 테스트를 수행하였다. 테스트 결과는 유압 액츄에이터 변화에 따른 후륜 조향각 변화를 관찰하는 방법으로 수행되었다. Figure 2에서와 같이 후륜 조향각 신호는 포텐서미터(Potentiometer)에 의해 ECU로 궤환 된다. AWS ECU는 차속과 전륜 조향각으로부터 목표하는 후륜 조향각을 찾고, 목표 값으로 후륜이 조향 되도록 유압 밸브들을 제어한다.

3.3 Test Result for the AWS ECU

후륜 조향각을 측정하는 포텐서미터는 Figure 4에서 보는 바와 같이 조향 장치의 중앙부에 위치하고 있다. 포텐서미터가 측정한 각과 후륜 좌, 우 조향각의 평균각과는 일정한 관계를 가진다. 포텐서미터에서 측정된 값과 후륜 평균 조향각은 Figure 4의 그래프와 같은 선형적인 관계를 가진다.

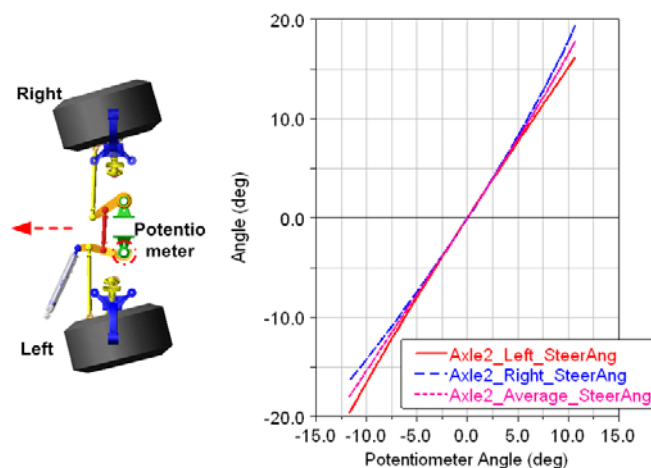


Fig. 4 Steering angle wrt Potentiometer angle

Figure 5는 2축 AWS ECU에 차속 31km/h와 임의의 전륜 조향각을 입력했을 때 시스템 응답을 보여주고 있다. 차량 속도 전 영역에 걸친 전륜 조향각 입력에 따른 후륜 조향각의 변화 결과는 Figure 6과 같다. 여기서, Ideal 값은 2축 조향각 산출을 위해 유도된 식 (1)에 따른 계산 결과이다. 테스트에 의한 2축 조향각 결과는 속도별로 보여주고 있다. 테스트 결과는 두 입력 조건에 대한 정상 상태에서의 후륜 조향각이다. Figure 6에서 전륜 조향각이 $\pm 5^\circ$ 범위내에 움직일 때 후륜은 조향되지 않는다. 이것은 운전자의 의도하지 않은 작은 조향각 또는 작은 조향각 오차에 대해서 후륜은 조향되지 않도록 하는 Dead zone의 영향이다. 차속 30km/h 까지 2축 조향각은 전륜 조향각 대비 약 47% 조향된다. 그러나 30km/h 부터 45km/h까지 후륜 조향각은 줄어든다. 그리고 45km/h 이상의 속도에서 후륜은 조향되지 않고 0° 를 유지한다.

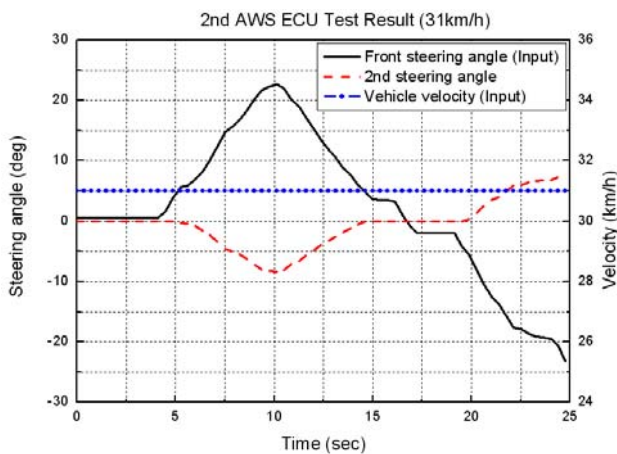


Fig. 5 System Response of 2nd axle AWS ECU

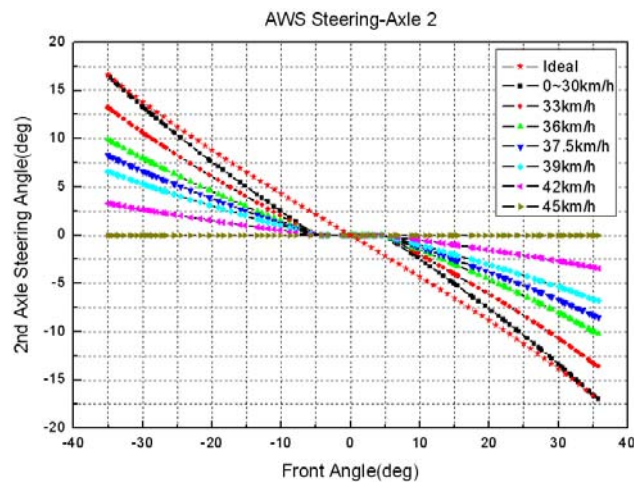


Fig. 6 Test Results of 2nd Axle AWS ECU

Figure 7은 3축 AWS ECU에 차속 20km/h와 임의의 굴절각을 입력했을 때의 시스템 응답을 보여주고 있다. 차량 속도 전 영역에 걸친 굴절각 입력에 따른 후륜 조향각의 변화 결과는 Figure 8과 같다. 여기서, Ideal 값은 3축 조향각 산출을 위한 식 (2)에 따른 계산 결과이다. 3축 AWS ECU의 경우 $\pm 2^\circ$ 범위에서 조향되지 않는 Dead zone의 영향이다. 굴절각은 전륜 조향에 비해 의도되지 않는 각도의 발생이 적기 때문인 것으로 분석된다. 차속 30km/h까지 3축 조향각은 굴절각 대비 약 50% 조향된다. 3축 조향각도 2축과 같이 30km/h 이후 줄어들고, 45km/h 이상에서는 조향되지 않는다.

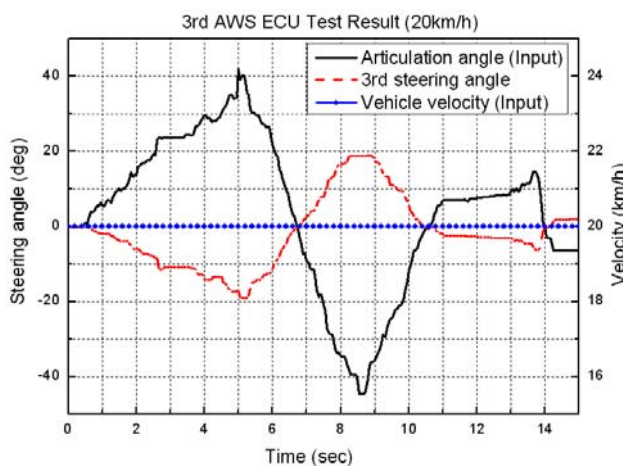


Fig. 7 System Response of 3rd Axle AWS ECU

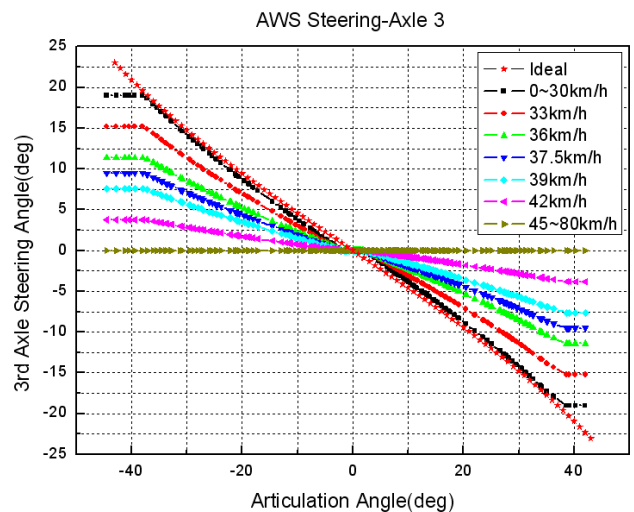


Fig. 8 Test Results of 3rd Axle AWS ECU

4. BI-MODAL TRAM DRIVING SIMULATION

4.1 MULTI-BODY DYNAMICS MODEL

AWS ECU 테스트에서 얻어진 결과를 이용하여 저상 굴절 버스의 거동을 분석하기 위한 동역학 해석을 수행하였다. 저상 굴절 버스는 전륜과 후륜 모두 더블 위시본 타입의 독립 현가장치를 채택하고 있다. 차량의 현가, 조향 장치 부품들은 조인트로 모델링 되었고, 타이어의 힘은 Magic Formular 식을 이용하였다.[10] Figure 9는 저상 굴절 버스의 Full car 모델을 보여준다.

AWS ECU 테스트 플랫폼의 결과 (Figure 6, Figure 8)를 동역학 모델에 적용하기 위해 Figure 10의 절차를 사용했다. 주행 해석 중 차량 모델에서 나오는 차속, 전륜 조향각, 굴절각 값을 이용해서 ECU 테스트 결과에 따른 2축, 3축의 조향각(desired angle)을 구한다. 후륜 조향각에 해당하는 실린더의 작동 거리를 기구학적 구속에 의해 움직이게 된다.

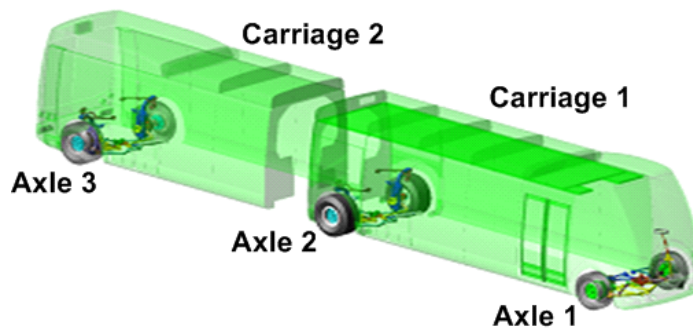


Fig. 9 Bi-modal Tram Full car Model

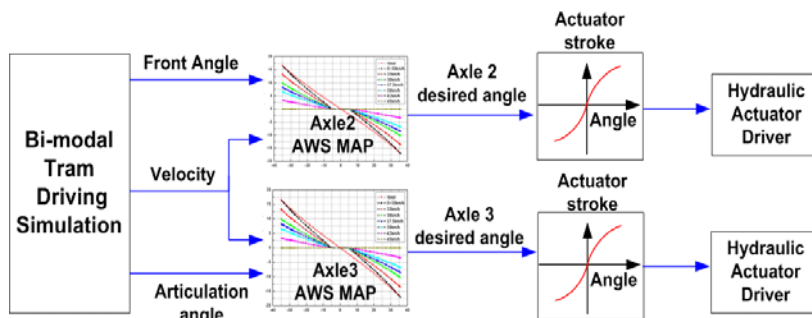


Fig. 10 AWS Control Procedure in Dynamics model

4.2 DYNAMICS MODEL VERIFICATION

AWS control 알고리즘 적용된 저상 굴절 버스 동역학 모델의 신뢰성 검증을 위해 실차 시험 결과와 비교 하였다. 실차 실험 데이터의 운전자 입력값(전륜 조향각, 속도)을 동역학 모델에 부여하여 해석하였다. Figure 11은 전륜 조향각 입력에 대한 운전자와 시뮬레이션 모델의 입력 비교 이다. Figure 12는 속도 입력에 대한 운전자와 시뮬레이션 모델의 입력 비교이다. 시뮬레이션에서 차량 속도는 실선의 프로파일을 추종할 수 있도록 저상 굴절 버스에 대한 구동력 제어를 통해 입력되었다. AWS는 주로 저속에서 작동되기 때문에 동역학 해석 결과와 실차 시험과의 비교는 저속에서 검증될 수 있다.

Figure 13은 2축 조향각에 대한 시험 결과와 시뮬레이션 결과와의 비교이다. ECU 테스트 플랫폼에서 분석된 AWS 알고리즘이 동역학 모델의 2륜 조향각에 잘 적용되고 있음을 확인할 수 있다. Figure 14는 굴절각에 대한 시험결과와 시뮬레이션 결과와의 비교이다. 굴절각은 차량의 거동에 의해 나타나는 것이다. 그래프에서 시험 결과와 해석 결과는 최대 3%의 오차를 가지는 것을 확인할 수 있다. Figure 15는 3축 조향각에 대한 결과비교이다. 3축 조향각의 시험과 해석결과와의 오차는 굴절각 오차의 영향을 받게 된다. 그래프에서 3축 조향각에 대한 AWS 알고리즘이 잘 적용됨을 확인할 수 있다.

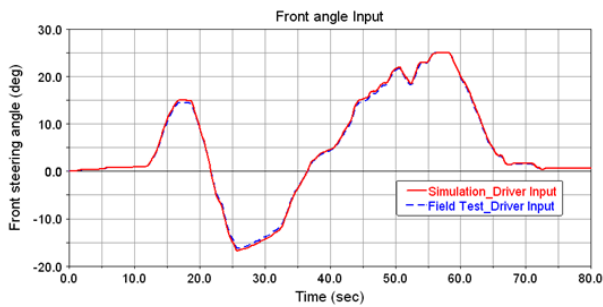


Fig. 11 Front angle Input Comparison

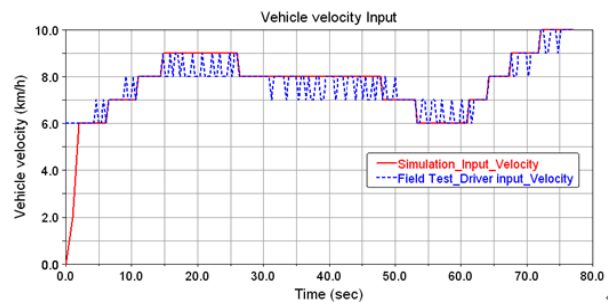


Fig. 12 Vehicle Velocity Input Comparison

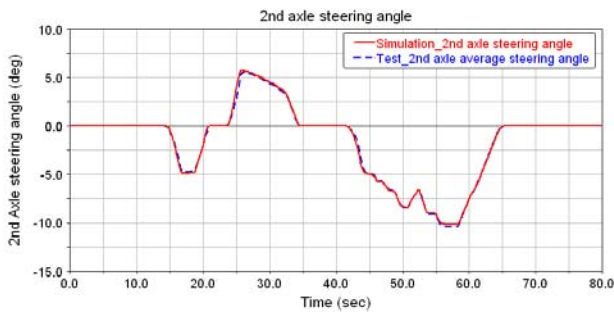


Fig. 13 2nd Axle Steering angle Comparison

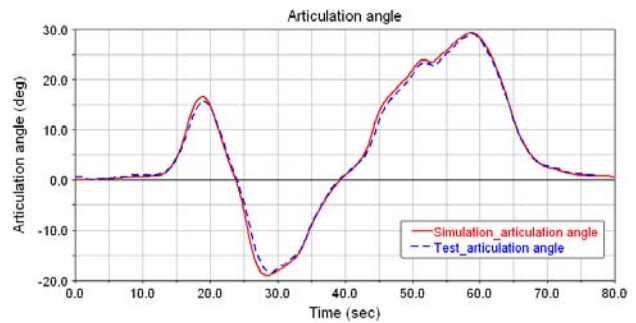


Fig. 14 Articulation angle Comparison

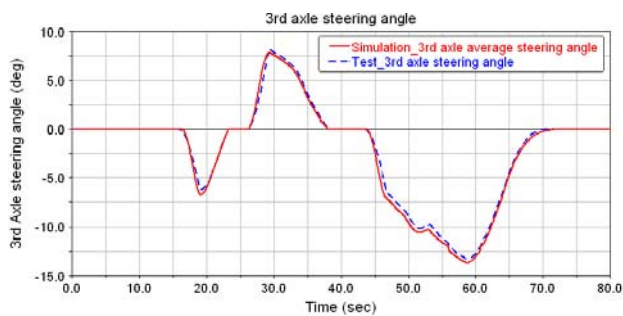


Fig. 15 3rd Axle Steering angle Comparison

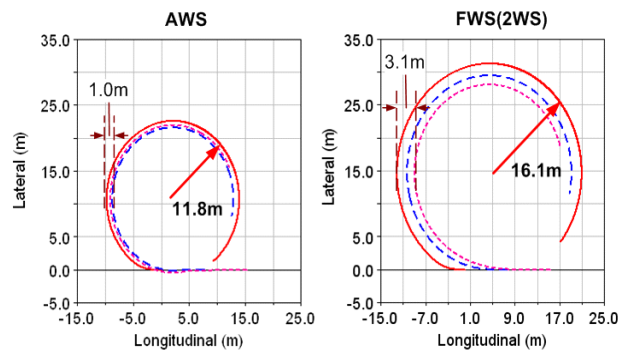


Fig. 16 Trajectory Comparison

4.3 SIMULATION 1 (J-TURN, 10km/h)

저상 굴절 버스의 검증된 동역학 모델을 이용하여 저속에서의 주행 시뮬레이션을 수행했다. AWS가 적용될 때와 적용되지 않은 경우(FWS)에 대해 J-turn 시뮬레이션을 수행 하였고, 초기 차속은 10km/h를 부여하였다. 저상 굴절 버스의 궤적을 분석하였다. Figure 16에서 보는 바와 같이 AWS가 적용될 경우 회전 반경은 11.8m, FWS의 경우는 16.1m로 약 4.3m의 회전반경 차이를 보였다. 특히, 차량의 궤적폭은 저상 굴절 버스의 복잡한 도심 내에서의 안전한 주행을 위해 최소화 시킬 필요가 있다. 궤적폭이 크면, 차량 선회 시 다른 물체와 접촉할 가능성이 더 크기 때문이다. AWS를 사용할 경우 궤적폭은 1.0m이고, FWS는 3.1m로써 약 2.1m의 차이를 보였다.

4.4 SIMULATION 2 (LANE CHANGE, 50km/h)

저상 굴절 버스의 주행 속도를 20km/h에서 50km/h로 가속시킬 때, AWS가 작동하는 경우와 작동하지 않는 경우에 따른 차량의 거동을 시뮬레이션 하였다. Figure 17은 AWS의 경우 전륜, 2축, 3축 조향각과 굴절각을 보여준다. AWS 제어 알고리즘에 따라 후륜 조향각은 차속 30km/h가 되는 7.5초부터 줄어들게 된다. 차속 45km/h가 되는 9.5초부터 후륜은 조향되지 않는 것을 확인 할 수 있다.

Figure 18은 저상 굴절 버스 carriage 1의 Yaw rate과 횡 가속도를 보여주고 있다. 횡 가속도는 7초와 9초 사이에서 AWS의 경우 FWS보다 크게 나타났다. Yaw rate 역시 4.5초와 9초 사이에서

AWS가 FWS보다 더 큰 것을 확인할 수 있다. 저상 굴절 버스의 시뮬레이션을 통해 AWS의 작동은 굴절차량의 회전 반경과 제적폭을 줄여준다. 한편으로는 FWS의 경우 보다 횡가속도와 Yaw rate은 더 크게 나타나기 때문에 차량의 안정성에는 부정적인 영향을 주는 것을 알 수 있다.

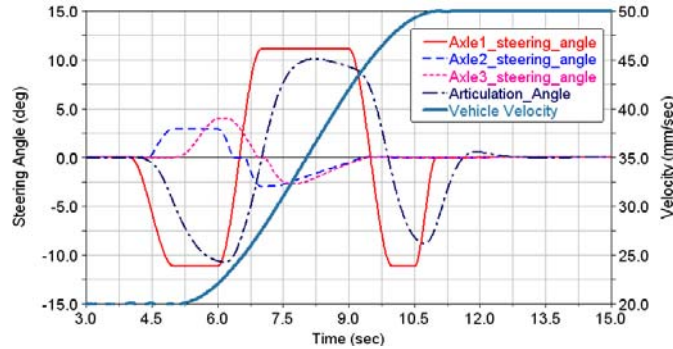


Fig. 17 Steering angle and Vehicle Velocity

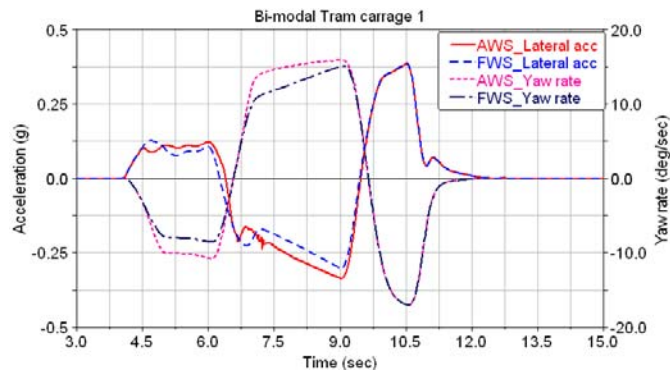


Fig. 18 Lateral Acceleration and yaw rate

5. CONCLUSION

본 논문에서는 AWS ECU 및 유압 시스템에 대한 HIL 환경의 테스트 플랫폼을 구축하였다. 테스트 플랫폼을 이용하여 ECU 테스트를 수행하였고, AWS 알고리즘을 분석하였다. AWS 알고리즘을 차량 동역학 모델에 적용하여 저상 굴절 버스의 동적 거동을 해석하였다.

본 논문에서 검증된 저상 굴절 버스의 동역학 모델을 이용하여 실시간 동역학 모델이 검증될 수 있다. 실시간 동역학 모델과 AWS ECU의 통합 시뮬레이션이 수행될 것으로 예상된다.

후기

본 연구는 국가교통핵심 기술 개발 사업에서 지원된 신에너지 저상굴절차량 개발 과제의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Shoichi, Sano., Yoshimi, F., and Shuji S., Four Wheel Steering System with Rear Wheel Steer Angle Controlled as a Function of Steering Wheel angle, *SAE Paper*, No. 860625, SAE, 1986
2. Duane, R. Pillar., and Eric, E. Braun., All-Wheel Steering System for Heavy Truck Applications, *SAE Paper*, No. 952680, SAE, 1995
3. Kaneko, T., Iizuka, H., and Kageyama, I, Steering control for advanced guideway bus

system with all-wheel steering system, *Vehicle System Dynamics*, Vol. 44, pp.741-749, Taylor & Francis, 2006.

4. Cho, K. S., Choi, Y. H., Hwang, J. Y, Yang, S. Y., and Park, S. T., An Efficient Simulation Platform for the Development of ABS using Hardware In the Loop System, *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 7, No. 2, pp.300-311, KSAE, 1999
5. Lee, S. J., Park, K., Hwang, T. H, Jung, Y. C., and Kim, Y. J., Development of Hardware in the Loop Simulation System as a Testbench for ESP Unit, *Int. Journal of Automotive Technology*, Vol. 8, No. 2, pp. 203-209, 2007
6. Suh, M. W., Lee, H. J., and Park, Y. K., Development of Hardware in the loop Simulator for TCS, *Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 7, No. 5, pp.194-205, KSAE, 1999
7. Park, T. J., Yun, S. C., and Han, C. S., A Development of Hardware in the Loop Simulation System for a EPS System, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 24, No. 12, pp.2883-2890, 2000
8. Thomas D. Gillespie, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, SAE, 1992
9. KVASER, www.kvaser.com
10. Pacejka, *Tire and Behicle Dynamics*, SAE, 2002