

차량 전자 제동 시스템을 위한 실시간 시뮬레이터 개발 Development of Real-time Simulator for Vehicle Electric Brake System

천세영¹ · 최성웅² · 양순용^{3*}

Se Young Cheon, Seong Woong Choi and Soon Yong Yang

Received: 08 Feb. 2019, Accepted: 19 Feb. 2019

Key Words : SILS(루프 시뮬레이션), ABS(잠김 방지 브레이크 시스템), Electric Brake(전자 브레이크), RT Simulation(실시간 시뮬레이션)

Abstract: This paper develops ABS braking real - time simulator to develop vehicle braking system by simulation. Recently, real-time simulation is widely used in the development of vehicles to decrease development time. In the field of electronic braking, real-time simulation is actively underway. In order to simulate electronic braking model in real time, a vehicle model, a hydraulic model, and a control S/W model are required. These models must be calculated in one platform. Therefore, in this paper, a vehicle model composed of CarSim and a hydraulic model composed of SimulationX using S/W in actual ABS controller was developed as a Simulink model base and linked with Matlab real time model. Using this real-time model, design effects of the electronic braking controller were simulated according to road surface condition to verify its operability.

기 호 설 명

- D_v : wheel speed difference
- D_A : wheel acceleration difference
- a : wheel acceleration
- λ : slip ratio
- V_{ref} : vehicle reference speed
- Th_{na} : wheel deceleration threshold
- λ_{lim} : wheel slip ratio threshold

1. 서 론

ABS(Anti-Lock Brake System)은 차량의 제동 시 발생하는 Wheel Lock 현상을 방지하기 위해 타이어의 최적 Slip으로 차량을 제동하는 시스템이다. ABS 시스템은 1970년대 Bosch가 개발한 후 최근 많은 국가에서 차량 제동 시 발생하는 사고를 감소시키기 위해 필수 옵션으로 법규로 제정하고 있다. ABS의 효과는 크게 차량 제동 안정성 향상, 최적의 제동거리 확보이다.

차량 제동 안정성 향상은 Low-mu 노면 혹은 좌우 바퀴의 노면 상태가 다른 Split 노면에서 각각의 노면 상태를 인지하고 제동력을 조절하여 Wheel Lock을 방지 제어를 수행하고, 제동 시 발생하는 차량의 Spin 현상을 방지한다.¹⁾ Spin을 방지하여 운전자의 지에 맞게 차량이 제동하도록 차량을 제어한다. 조향 안정성 유지는 선회 제동 시 좌우에 불균형에 의해 발생하는 Cornering Force를 충분히 유지시켜, 운전자의 의지에 의한 차량 조향을 가능하도록 유도한다.²⁾ 최

* Corresponding author: soonyy@ulsan.ac.kr
 1 Brake Control Engineering Team, Hyundai Mobis, Yongin-si, Gyeonggi-do 16891, Korea
 2 Department of Construction Machinery Engineering, University of Ulsan, Nam-gu, Ulsan 44610, Korea
 3 Department of Mechanical Engineering, University of Ulsan, Nam-gu, Ulsan 44610, Korea
 Copyright © 2019, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

적 제동거리는 Slip Ratio를 노면 마찰 계수가 최대인 상태에서 제동을 제어하여 Wheel lock에 의해 발생하는 타이어 미끄러짐을 최소화시킴으로써 얻어진다.³⁾

전자제동장치의 제어는 차량 제동에 의한 차량의 주행 상태가 불안정해지면 작동하는 시스템이므로 이를 실제 차량에서 개발하는 것은 숙련된 전문가가 아니면 매우 위험하다. 또한, 숙련된 개발자라도 정해진 코스를 매번 정확히 똑같이 주행하기 어렵고 기후, 노면, 타이어 상태가 매번 같을 수 없어, 신뢰성 있는 데이터를 확보하기 위해 수많은 반복 테스트를 진행한다. 많은 시간과 인력이 필요한 반복 테스트는 차량 개발 기간이 길어지는 가장 큰 요소가 된다.

최근 선진사의 경우 실제 차량 개발 전 Real Time Simulation을 이용한 제어 장치를 개발함으로써 개발 기간과 인력을 줄이고 개발 주기를 점점 짧게 가져가는 노력을 하고 있다.⁴⁾

본 논문에서는 차량 제동 시스템을 Simulation을 이용하여 Hardware와 Software를 모델링하여 Simulation In the Loop Model로 구성했고 이를 통해 ABS 제어 로직을 개발하는 방법에 대해 연구하였다. Simulation을 이용하여 테스트 환경에 제약을 없애고 수많은 테스트 시나리오를 빠르게 수행할 수 있어 전자제동장치 개발 시간을 많이 줄일 수 있다. 또한 제품 개발 프로세스에서 제품 생산 전 설계 확인을 할 수 있게 되어 제품 개발 오류를 줄일 수 있다.

2. System 및 시뮬레이션 구성

차량 전자제동장치의 요소들은 Fig. 1과 같이 차량에 장착된다. 기존 Conventional Brake 시스템인 부스터 마스터 실린더에서 Caliper로 연결되는 유압 라인 사이에 장착되어 제동장치 유압을 조정해준다. 그리고 ABS에서 4 wheel drive 차량의 경우 기준 차속 V_{ref} 를 추정을 위해 종방향 가속도 센서를 장착하기도 한다. ABS 제어에서는 차량의 λ (슬립률)을 계산하기 위해 각 Wheel에 Wheel Speed Sensor(Wss)를 장착하고, 그 외 운전자 제동 의지를 판단하기 위해 Brake Switch(BS) 혹은 Pedal Travel Sensor(PTS)를 사용하기도 한다. 시뮬레이션 구성은 Fig. 2와 같다.

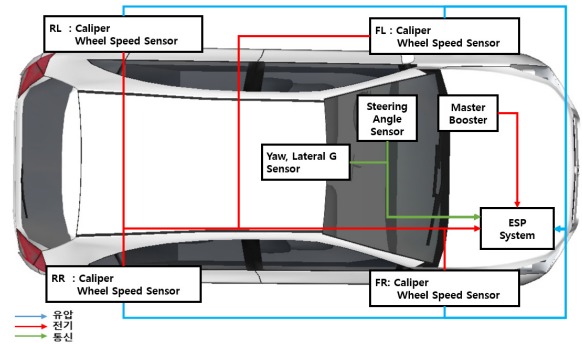


Fig. 1 Configuration Diagram of Vehicle Braking System

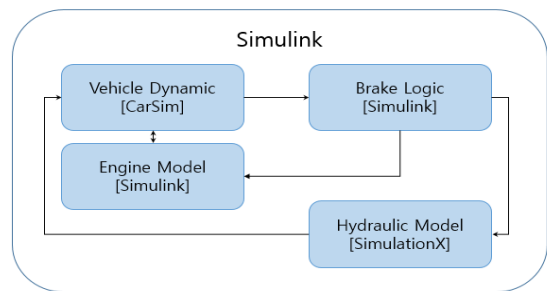


Fig. 2 Simulation Configuration

Simulation 구성은 Matab(Simulink, State Flow), CarSim, SimulationX으로 이루어져 있다. 대상 차종은 일반적으로 많이 판매되는 C-Segment Data를 사용하였다. C-Segment Data를 이용하여 MSC사의 CarSim으로 차량을 모델링 하였고, 엔진 Model은 향후 개발될 TCS, VDC Engine Control을 개발하기 위해 Simulink를 이용하여 External Model로 별도 개발하였다. ABS Hydraulic 및 Conventional Brake Model은 SimulationX를 이용하여 개발하였다.

모든 Model은 Matlab Simulink에서 연결되어 Fig. 3과 같이 구성되며 Fixed Step Solver를 사용하였다.

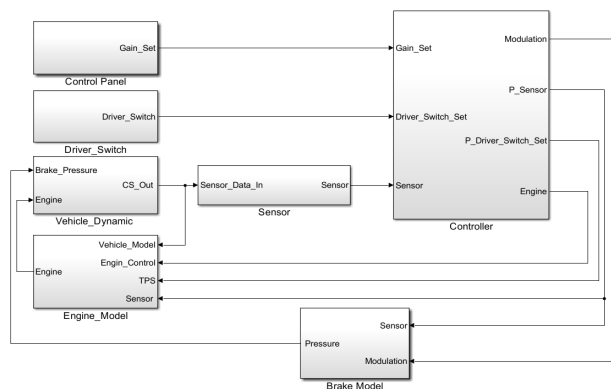


Fig. 3 Simulink Model of ABS Simulation

Step Size는 1 [ms]으로 설정했고 ABS 제어는 추후 Code Generation을 하여 제어기에 사용해야 되기 때문에 5 [ms]의 주기로 설정했다. ABS 제어기에 사용되는 Sensor Model은 ABS 제어기의 주기와 같도록 설계되어 있고, 실제 ECU AD Quantizer와 같도록 처리하였다. 실제 ECU에 S/W를 Download하여 사용했을 때 제어를 변경할 수 있는 Parameter 들을 별도로 분리시켜 향후 차량에서 Parameter를 변경하며 대상 차량의 최적 제어 Parameter로 튜닝 할 수 있도록 구성하였다.

3. 유압 Model

ABS 유압 Model은 Fig. 4와 같다. Master Cylinder와 Caliper 사이 전자제동장치를 장착하여 운전자에 의해 발생한 유압을 배분시켜 ABS 제어를 구현한다. 각 Wheel 에는 두 개의 전자 밸브가 독립적으로 장착 되어 있으며 Normal Open Type인 Inlet Valve를 이용하여 압력을 Hold 혹은 Apply 시킨다.^{3),5)} Inlet Valve와 Caliper 사이에는 Normal Close type인 Outlet Valve가 장착되며 Caliper의 압력을 Release 시킨다. Release된 유체는 전기 모터와 유압펌프를 이용하여 마스터 실린더로 회수시켜 연속적인 ABS 작동을 하도록 한다. Fig. 5, 6은 실제 설계 파라미터를 이용하여 SimulationX으로 구성한 Model이다.

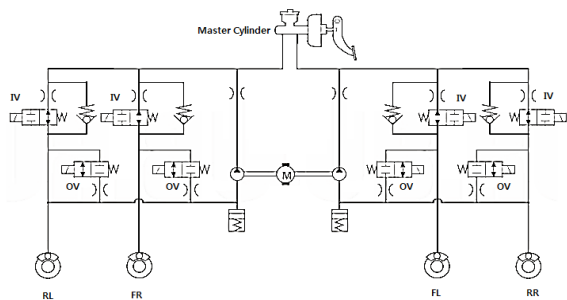


Fig. 4 ABS Hydraulic Module

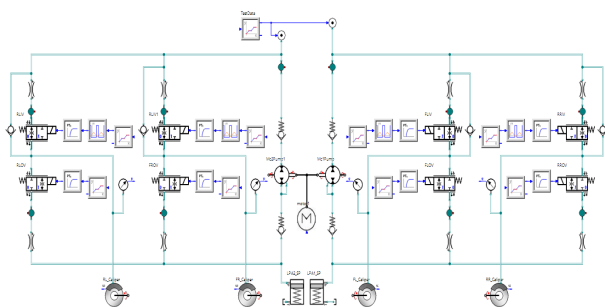


Fig. 5 SimulationX Model of ABS Hydraulic

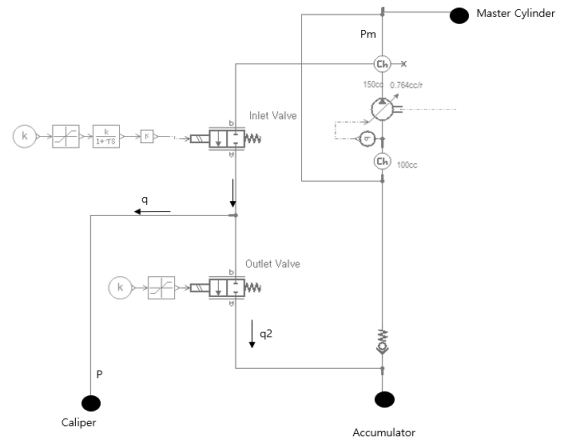


Fig. 6 ABS hydraulic system : 1 Wheel

운전자의 입력과 전기모터와 유압펌프에 의해 회수되는 입력 측의 압력을 P_m 이라 하고 Inlet Valve에 의해 발생하는 유량을 q_1 , Outlet Valve에 의해 발생하는 유량을 q_2 라고 하면 유량 방정식에 의해 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$q = q_1 + q_2 \tag{1}$$

$$q_1(t) = C_d A_1(t) \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_s - p(t))} \tag{2}$$

$$q_2(t) = C_d A_2(t) \sqrt{\frac{2}{\rho} (p(t) - P_r)} \tag{3}$$

Caliper Model의 소요액량은 Fig. 7과 같이 구성하였다. Caliper Model은 유체특성, 마찰재 특성 등 비선형적 요소들로 인해 실시간 Model로 구축하기 매우 어렵다. Caliper Model은 실제 Caliper를 이용하여 인가 압력에 따른 소요 액량 시험을 수행하여, 시험 결과를 Lookup Table 형태로 유압 Caliper를 모델링하였다. Fig. 7은 Caliper 소요액량 시험결과와 그 결과를 Table 형태로 유압 모델에 사용한 그림이다.

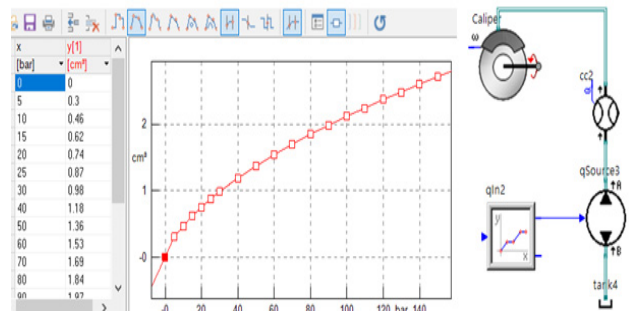


Fig. 7 Caliper Model and Required Fluid Level

4. ABS 해석 모델

Fig. 8은 ABS Logic Configuration과 이를 Simulink Model로 구성한 그림이다. ABS Logic은 Estimation, ABS Controller, Modulator로 구성된다. ABS Estimation은 입력되는 차량의 Wheel 속도 값을 이용하여 차량의 기준 차속 V_{ref} 와 각 Wheel에 Slip Ratio를 계산하고, ABS 진입 조건을 판단할 수 있는 변수들을 생성한다. ABS Controller는 Estimation에서 계산되는 차량의 상태 판단 변수들로부터 ABS 제어를 연산하고 상황에 맞는 제동 유압 Valve들의 작동 값을 계산한다. 또한 Split 노면에서 안정성을 주기 위해 GMA 알고리즘⁵⁾을 사용했으며, 후륜 제동 안정성을 확보하기 위해 Rear Stable 알고리즘⁵⁾을 사용하였다. Modulator 부분은 ABS Controller에서 발생한 값을 받아 실제 제동 유압장치 밸브에 사용하는 값으로 변경하여 출력하고, ABS 상태 Flag 등을 출력한다.

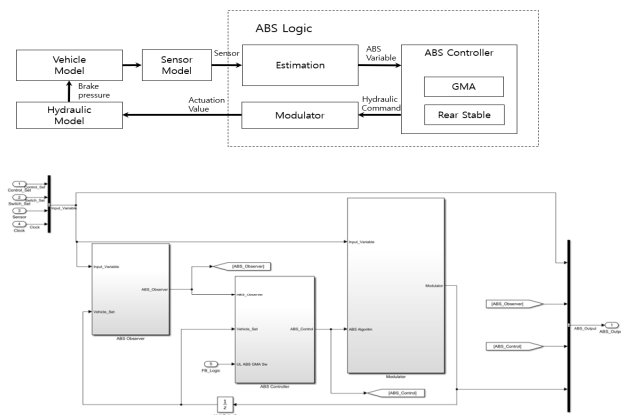


Fig. 8 Configuration and Modeling of ABS Model

Estimation에서는 입력되는 Wss 를 이용하여 V_{ref} 와 각 Wheel 상태를 계산하고 ABS 진입 시점에 대한 변수를 만든다. Wheel 상태 D_v, a, D_a, V_{ref} 변수는 다음 식과 같이 계산한다.

$$D_v = V(i) - V(i-1) \tag{4}$$

$$a = \frac{D_v(i) + D_v(i-1)}{2} \cdot \frac{1}{3.6g\Delta t} \tag{5}$$

$$D_a = a(i) - a(i-1) \tag{6}$$

$$D_a < 0, V_s = Max(V_{fl}, V_{fr}, V_{rl}, V_{rr}) \tag{7}$$

$$D_a > 0, V_s = Max(V_{rl}, V_{rr}) \tag{8}$$

$$V_{ref} = f(V_s, V_{ref-1} - \alpha, \lambda_{old}) \tag{9}$$

대상 차종은 전륜 구동 차량으로 후륜은 비구동륜으로 가속 시 차체 속도를 추정하기 위한 기준으로 사용할 수 있다. 감속 시에는 타이어 미끄러짐에 의해 정확한 V_{ref} 를 구하기 어렵다. 감속 조건에서는 V_{ref} 기준으로 진입 속도 및 진입시 노면과 타이어의 슬립율을 초기 Reference로 사용하고 V_{ref} 를 연산한다. 감속기 V_{ref} 의 기준 연산 Wheel의 경우 각 Wheel 중에서 가장 큰 Wheel 속도 값을 이용하여 V_{ref} 계산에 사용한다. V_{ref} 와 각 Wheel의 입력되는 속도의 차이를 이용하여 Slip을 이라고 하고 다음 식과 같이 계산한다.

$$\lambda = \frac{V - V_{ref}}{V_{ref}} * 100 \tag{10}$$

ABS Mode로의 진입 등을 결정하는 변수는 V_{ref} 와 각 Wheel에서 발생하는 속도의 감속도와 Slip양의 차이를 이용한다. Fig. 9는 ABS 제동 시 발생하는 V_{ref} 와 Wheel에 발생하는 현상을 나타내고 있다.

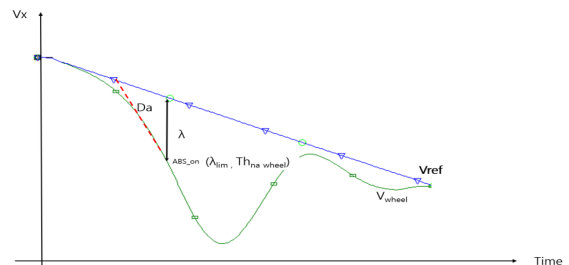


Fig. 9 Wheel Behavior during ABS Braking

ABS Mode로의 진입 등을 결정하는 값은 감가속도의 허용치 Th_{na} 이다. 차속에 따라 차량의 제동 시 발생하는 Pitch Motion이 변화하기 때문에 V_{ref} 를 기준으로 고속일 경우와 저속일 경우에 각각의 Wheel의 허용 감가속도 값을 상수 형태로 정하고 차량의 특성에 맞도록 튜닝하기 위해 변수 형태로 사용한다. 차량마다 타이어 및 제원 특성이 다르기 때문에 Wheel Lock이 발생하는 기울기와 Wheel Lock이 해제되는 기울기가 다르다. 이를 반영하기 위해 Slip 허용 값은 λ_{lim} 는 ABS의 작동 유무에 따라 다른 값을 갖도록 변수 처리하였다.

$$V_{ref} > V_{Th_{na}}, Th_{na} = (Th_{nafront}, Th_{narear}) \quad (11)$$

$$V_{ref} \leq V_{Th_{na}}, Th_{na} = (Th_{nawheel}) \quad (12)$$

$$ABS_{on}, \lambda_{lim} = (\lambda_{ABSonfrontlim}, \lambda_{ABSonrearlim}) \quad (13)$$

$$ABS_{off}, \lambda_{lim} = (\lambda_{ABSofffrontlim}, \lambda_{ABSoffrearlim}) \quad (14)$$

ABS 제어 진입은 각 Wheel의 Th_{na} 를 초과하고 slip 허용치인 λ_{lim} 넘는 경우에 진입된다.

ABS Controller에서는 Th_{na} 를 초과하는 상황이 발생하면 각 Wheel의 속도를 지속적으로 감속하기 시작하며 이 시점부터 각 Wheel 속도와 V_{ref} 를 비교하여 Slip 값을 추적한다. Th_{na} 를 초과하면 Wheel Slip이 발생하므로 slip이 발생하는 wheel의 감속도는 급격하게 변화하므로 V_{ref} 를 연산하기 어렵다. 따라서 Th_{na} 의 설정 값이 초과되면 Estimation에서 계산되는 V_{ref} 는 Wheel 속에 추종하지 않고 일정 감속 기울기를 갖도록 설계하였다. 본 논문에서는 Default Value로 -1g로 설정했고 향후 차량에서 시험할 때 변경할 수 있도록 튜닝 변수로 설정하였다. Th_{na} 가 설정 값보다 초과되고, 설정된 일정 감속 기울기의 V_{ref} 값과 Wheel 속이 차이가 λ_{lim} 이상 벌어지면 ABS로 진입하게 된다.

5. ABS Mode 성능 평가

구축한 Model에 의한 시뮬레이션 결과는 High-mu, Low-mu, Split-mu, Circle 노면에서 제동 시 ABS 성능을 검증하였다. 이는 전자 제동 Test에서 기본이 되는 시험 항목이다.

High-mu 시험은 직선도로 80km/h에서 급제동(150bar) 상황으로 Simulation 했고 결과는 Fig. 10과 같다. Wheel Slip 발생으로 ABS 동작 조건에 진입하

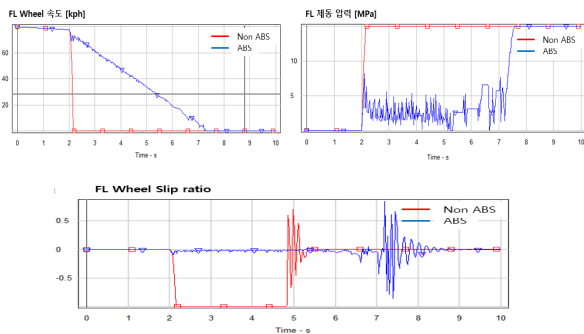


Fig. 10 Results of High-Mu ABS Test

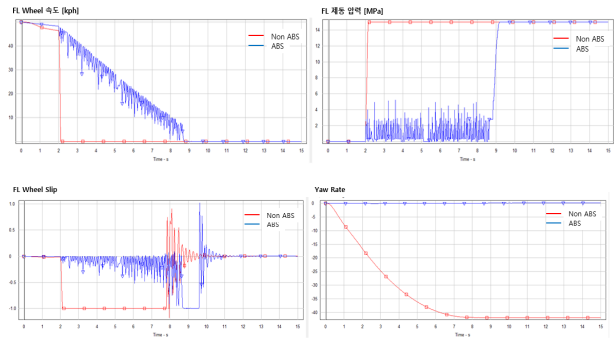


Fig. 11 Results of Low-Mu ABS Test

여 ABS 제동이 시작되면 차량의 Wheel과 노면간 λ 은 0으로 추종하는 것을 확인 할 수 있다. ABS가 없는 경우 차량 슬립이 100% 발생하여 차량의 Wheel이 Lock이 되어 제동된다.

Low-mu Test 는 직선도로 50km/h, 노면 0.3mu에서 급제동(150bar) 상황으로 Simulation했고 결과는 Fig. 11과 같다.

Low-mu 노면 특성상 Wheel 변화가 빠르게 일어나며 High-mu 상태에서 보다 많은 제어가 작동하는 것을 Wheel 속도 변화와 λ 의 변화로 확인 할 수 있다. 또한 Low-mu의 경우 ABS 제어의 유무에 따라 차량 거동 중 Yaw Rate 변화가 있는 것을 실차 시험과 마찬가지로 확인 할 수 있다.

Split-mu 노면의 경우 Low-mu와 같은 조건에서 0.2/0.5로 설정하여 Simulation했고 결과는 Fig. 12와 같다.

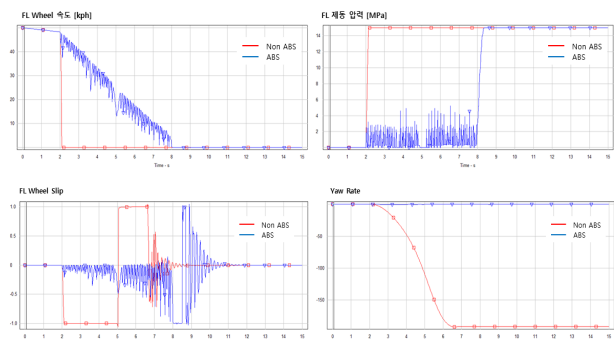


Fig. 12 Results of Split-Mu ABS Test

Split-mu 노면에서 ABS 차량은 제동 중 차량이 회전하는 현상을 Wheel Slip Graph에서 Slip Ratio가 천이되는 것으로 확인할 수 있다. 본 논문에서는 Split-mu 노면에서 차량 직진 제동 안정성을 주기 위해 GMA 알고리즘을 구성했고 이에 좌우 Wheel의 차속과 압력은 다음 Fig. 13과 같다.

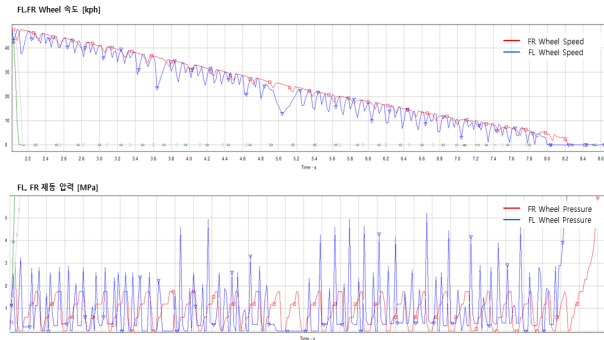


Fig. 13 Results of Split-Mu ABS Test for FL, FR Wheel

FL Wheel의 Road-mu가 낮기 때문에 FL Wheel 거동이 FR 보다 상대적으로 많이 일어난다. 이는 압력을 Apply하는 속도의 좌우가 달라져 차량의 Yaw Moment가 발생한다. 이에 GMA 알고리즘을 이용하여 FR Wheel의 압력 상승량을 조절하여 차량의 Yaw Moment 안정을 확보한다. Fig. 14는 Circle Test에서 제동 Simulation을 수행한 결과이다. Circle의 반경은 500ft로 설정했고, Low-mu와 같은 조건으로 Simulation하였다.

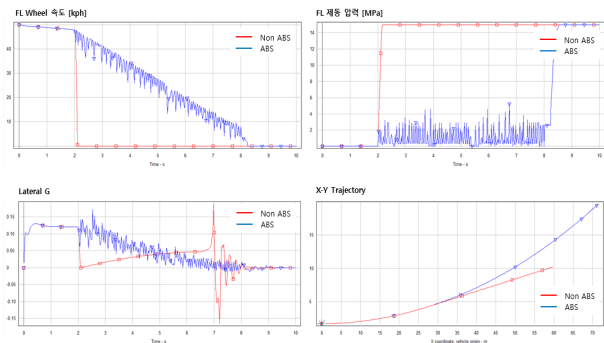


Fig. 14 Results of Circle Braking Test

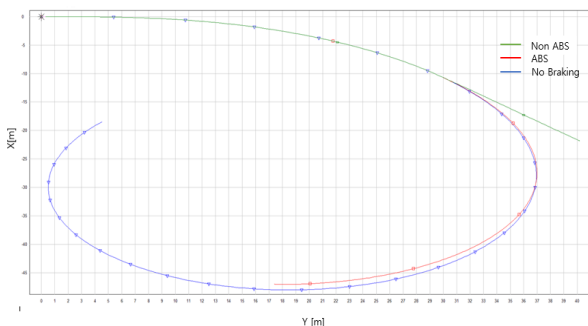


Fig. 15 Results of J-turn Braking Simulation

Circle 노면에서 제동 시 ABS가 작동하면 Neutral Steering에 근접하게 제동하는 것을 확인 할 수 있다.

또한 차량 제동 시 ABS가 작동하지 않은 차량은 순간적인 Lateral G 변화에 의해 차량이 불안정해진다. 반면 ABS가 작동하면 차량은 횡방향 제어가 되어 안전하게 제동하는 것을 확인 할 수 있다. Fig. 15은 J-turn Simulation 결과 차량의 선회 안정성을 나타낸 그래프이다. J-turn 조건 High-mu, 50km/h에서 180deg/sec로 조향을 인가한 후 150bar로 제동하였다.

ABS가 없는 경우 차량의 제동은 Understeer가 발생되어 차량이 선회시 정상적인 제동을 수행할 수 없지만, ABS가 작동하면 선회 제동 시에도 회전 경로를 추종하여 동작 되는 것을 확인 할 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 Real Time System으로 ABS 제어기 및 HW 시스템을 시뮬레이션 할 수 있는 환경을 구축하였다. 유압 Model은 실제 설계 데이터를 반영하여 Fixed Step Solver에서 구동할 수 있도록 Simple Model로 개발하였고, 차량 Model 또한 CarSim을 이용하여 실시간 Model로 구성하였다. 구축된 Real Time 환경에서 Simulink로 실제 차량에서 사용하는 ABS 제어 로직을 설계하였고, 설계한 알고리즘과 같이 작동하는 것이 확인되었다. 실시간 Model에서 ABS 동작으로 ABS 유무에 따라 차량 거동을 확인한 결과 실제 차량에서의 제어 동작과 유사하게 동작되는 것을 확인하였다. 실시간 Model에서 개발된 Model이 실제 상황과 유사한 경향으로 나타났다. 구축된 시스템은 차량전자제동 제어로직 개발에 유용하게 사용될 것으로 생각된다. 향후 TCS, VDC 제동 제어를 추가하고, 유압 및 전자 H/W Model을 더 정밀하게 구축할 예정이다. 제어 로직은 Code Generation을 이용하여 실제 제어기에 탑재하여 Simulation과 실차 데이터를 비교하여 Model의 정확성을 향상시킬 계획이다.

References

- 1) W. D. Jonner and A. Czinczel, "Upgrade Levels of the Bosch ABS", SAE Technical Paper 860508, 1986.
- 2) H. Leiber and A. Czinczel, "Four Years of Experience with 4-Wheel Antiskid Brake Systems (ABS)" SAE Technical Paper 830481, 1983.
- 3) J. H. Choi et al., "A study on the Braking

- Characteristic of Control Methods for ABS Mounted Vehicle”, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol.19, No.8, pp.203~211, 2002.
- 4) K. S. Cho et al., “An Efficient Simulation Platform for the Development of ABS using Hardware-In-the-Loop System (HILS)”, Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers. Vol.7, No.2, pp.300~311, 1999.
- 5) B. W. Kim and H. Park, “Hydraulic Control Characteristic of the ABS for an Automotive”, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.8 No.1 pp.10-17, 2007.
- 6) Y. H. Yoon and K. W. Lee, "Development of SIL, HILS Environment for Electronic Control System", Journal of Drive and Control, Vol.5, No.1, pp.17~21, 2008.
- 7) C. H. Park et al., "Autonomous Vehicle Driving Control Considering Tire Slip and Steering Actuator Performance", Journal of Drive and Control, Vol. 12, No. 3, pp.36~43, 2015.
- 8) H. S. Lee, S. J. Won and K. K. Ahn, "The Numerical Modeling and Sliding Mode Control of A New Submersible Fish Cage", Journal of Drive and Control, Vol.14, No.3, pp.18-24, 2017.