

공압식 ABS의 제어 알고리즘에 관한 연구

신지환* · 심우용 · 김문섭 · 황돈하 · 박도영 · 김용주
 한국전기연구소 산업전기연구단 메카트로닉스연구그룹

A Study on the Pneumatic ABS Control Algorithm

Ji-Hwan Shin* · Woo-Yong Shim · Moon-Sup Kim · Don-Ha Hwang · Doh-Young Park · Yong-Joo Kim
 Mechatronics Research Group, Korea Electrotechnology Research Institute (KERI)

Abstract - In this paper, a mathematical vehicle model, the braking force control parameters, the wheel control logic, and vehicle control strategy are presented. In order to analyze the dynamic characteristics of a vehicle equipped with ABS(Antilock Brake System). The full vehicle dynamics model is constructed with sprung mass, brake system, and wheels to verify control algorithms. The valve control algorithms are designed with the wheel accelerations and slip ratio take into consideration. These algorithms are applied to the front and rear wheels independently. Simulation is performed under the wet road condition at initial braking speed of 60 [km/h].

대상 차량은 차체와 전후방 차축, 4개의 차륜의 강체로 구성되어 있고, 차체의 종방향, 횡방향, 수직방향의 병진운동과 롤(roll), 피치(pitch), 요(yaw)의 회전운동, 전후방 차축의 수직운동과 롤운동, 각 차륜의 회전운동을 포함하는 14자유도의 동역학적 모델을 구성하였다. 차량의 좌표계는 공간에 고정되어 있는 절대좌표계와 차체의 무게 중심에 고정된 고정좌표계를 사용하였다.

공압 브레이크 시스템이 장착된 중형 버스를 대상으로 하여 차량에 대한 운동을 해석하기 위해 다음과 같은 가정을 한다. 차량은 좌우 대칭이며, 타이어의 강성은 등가 스프링으로, 충격 흡수기와 현가 스프링은 병렬로 간주한다. 뉴턴-오일러 방정식을 이용하여 3차원 강체에 대한 운동방정식을 다음과 같이 유도하였다. 그림 1은 본 연구에 사용된 14자유도의 차량모델을 나타낸다.

1. 서론

최근 자동차의 고속, 고성능화의 추세에 따라 우수한 조향성능과 함께 주행 안정성의 핵심인 차량의 주행제동 성능이 강조되고 있다. 차량의 안정성, 제동성, 조종성 및 구동성을 향상시킬 수 있는 장치에 대한 연구가 선진국을 중심으로 활발히 이루어져 실제 차량에 장착됨으로써 차량의 주행 안정성과 고급화에 크게 기여하고 있다.

ABS(Antilock Brake System)는 1900년대 초 철도 차량에 적용되기 시작하여 항공기 및 자동차 분야로 확대 적용되었다. 자동차 분야에서 ABS는 해마다 장착이 증가되고 있으며, 특히 대형 차량의 경우에는 안정성에 관한 사회적 요구의 증가에 부응하여 1999년 이후 국내의 모든 대형 차량에 ABS 장착이 의무화되었다. 그러나, 소형 차량의 경우에는 많은 연구가 진행되어 국산화를 이룩했지만, 대형 차량의 ABS관련 기술은 크게 미진한 상태이다. 이에 따라 국내 차량사는 외국 선진업체의 ABS를 전량 수입하여 장착하고 있는 실정이다.

본 논문에서는 대형 차량의 ABS 시스템 개발을 위한 기초적인 연구로서, 공압식 브레이크를 채용한 상용차에 대한 ABS 제어 알고리즘을 검증하고, 제어기법에 따른 차량의 제동성능을 비교 분석한 결과를 제시한다. ABS 제어기의 유무에 따른 제동특성의 분석을 위해 PID 제어기와 Fuzzy 제어기를 설계하였고, Matlab/Simulink를 이용하여 시뮬레이션하였다. 점착력이 낮은 젖은 노면상태에서 직진 주행중인 차량에 제동력을 가했을 때 차량의 동특성 해석을 위해서, 14자유도의 차량 동역학 모델을 구성하여 차량과 차륜의 운동 방정식을 유도하였고, 제동장치의 모델링을 통하여 차량과 차륜의 속도 및 가속도를 계산하고, 슬립율을 제어변수로 사용하여 차량의 안정성을 판단하는데 활용하였다.

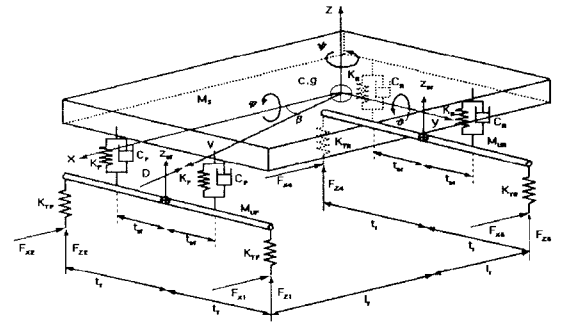


그림 1. 14-D.O.F. Vehicle Model

2.2 운동방정식

그림 1에 나타난 14자유도 차량모델을 이용하여 차체, 차축 및 차륜의 운동 방정식을 유도하였다. 스프링 질량의 병진운동 및 회전운동에 대한 운동방정식은 식 (1)~(6)과 같다.

$$M\ddot{x} + M_e\ddot{\theta} = \sum F_x - M(\dot{z}\dot{\theta} - \dot{y}\dot{\psi}) - M_e\dot{\phi}\dot{\psi} + (M_{ul}l_f - M_{ur}l_r)\dot{\psi}^2 \quad (1)$$

$$M\ddot{y} - M_e\dot{\phi}\dot{\psi} + (M_{ul}l_f - M_{ur}l_r)\dot{\psi} = \sum F_y - M(\dot{x}\dot{\psi} - \dot{x}\dot{\phi}) - M_e\dot{\theta}\dot{\psi} \quad (2)$$

$$M_z\ddot{z} = \sum F_z - M_z(-\dot{x}\dot{\theta} + \dot{y}\dot{\phi} - e\dot{\phi}^2 - e\dot{\theta}^2) \quad (3)$$

$$I_x\ddot{\phi} - (I_y - I_z)\dot{\theta}\dot{\psi} = M_{ax}e\cos\phi + M_{ax}g\sin\phi + b\sum T_{s1} - t_{s1}(F_{d1} - F_{d2}) - t_{s1}(F_{d3} - F_{d4}) - K_{r1}(\phi - \phi_{ul}) - K_{r1}(\phi - \phi_{ur}) \quad (4)$$

$$I_y\ddot{\theta} - (I_z - I_x)\dot{\phi}\dot{\psi} = l_f(F_{d1} - F_{d2}) - l_r(F_{d3} - F_{d4}) - h\sum T_{s1} \quad (5)$$

$$I_z\ddot{\psi} - (I_x - I_y)\dot{\phi}\dot{\theta} = l_f(T_{s1} + T_{s2}) - l_r(T_{s3} + T_{s4}) - t_f(T_{d1} - T_{d2}) - t_r(T_{d3} - T_{d4}) - \sum M_{s1} \quad (6)$$

여기서, M 은 차량의 전체 질량, M_e 은 스프링 질량을 나타내고, $\sum F_x$ 는 각 차륜에 작용하는 구동력(또는 제동력)과 공기저항력의 합, $\sum F_y$ 는 각 차륜에 작용하는 횡방향력과 측면 공기저항력의 합, $\sum F_z$ 는 각 차륜에 작용하는 서스펜션에 대한 힘의 합, l 는 무게 중심에서 차륜 중심까지의 y방향 거리, t 는 차량의 무게 중심에서

2. Vehicle Dynamics Model

2.1 차량 모델링

제동시 노면상태에 따른 차량의 제동특성을 분석하고 각각에 대해 슬립율과 가속도를 제어변수로 하여 시뮬레이션을 수행하기 위한 차량의 모델을 구성하였다. 제어

서스펜션 장치까지의 y방향 거리, l은 무게 중심에서 차륜 중심까지의 x방향 거리, e는 무게중심에서 롤센터까지의 거리, b는 지면에서 롤센터까지의 거리, K_r은 롤 스테빌라이저의 강성을 나타낸다. 철자 f와 r은 각각 전방과 후방, i는 각 차륜을 의미한다.

그리고, 언스프링 질량의 병진운동 및 회전운동에 대한 운동방정식은 식 (7)~(10)과 같다.

$$M_{uf}\ddot{z} = -K_f(z_{uf} - z_{r1} + t_f\phi_{uf}) - K_r(z_{uf} - z_{r2} - t_r\phi_{uf}) + F_{r1} + F_{r2} \quad (7)$$

$$M_{ur}\ddot{z} = -2K_f(z_{ur} - z_{r3} + t_f\phi_{ur}) - 2K_r(z_{ur} - z_{r4} - t_r\phi_{ur}) + F_{r3} + F_{r4} \quad (8)$$

$$I_{xuf}\dot{\phi}_{uf} = t_{yf}F_{r1} - t_{yf}F_{r2} - t_{yf}F_{r3} + t_{yf}F_{r4} - K_{rj}(\phi_{uf} - \phi) \quad (9)$$

$$I_{xur}\dot{\phi}_{ur} = t_{yr}F_{r3} - t_{yr}F_{r4} - t_{yr}F_{r1} + t_{yr}F_{r2} - K_{rj}(\phi_{ur} - \phi) \quad (10)$$

여기서, M_u는 전후방 축의 질량, I_u는 전후방 축의 관성모멘트를 나타낸다. K_f는 타이어 강성을 나타내며, 후방 차축의 양측 타이어는 각각 전방 타이어 2개를 이용한 모델로 가정하였다.

한편, 차량이 감속될 때 차륜에는 그림 2와 같은 여러 종류의 힘이 작용하고, 차륜 회전운동에 대한 운동방정식은 식 (11)과 같다.

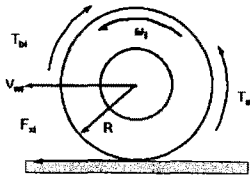


그림 2. Wheel Model

$$I_w\dot{\omega} = T_{si} - T_{bi} - R F_{xi} - \mu R F_{zi} \quad (i=1,2,3,4) \quad (11)$$

여기서, ω는 차륜의 회전속도, I_w는 차륜의 관성 모멘트, R은 타이어의 유효반경을 의미한다. T_{si}, T_{bi}, μRF_{zi}는 각 타이어에 작용하는 동력원으로부터의 구동토크, 제동토크, 구름저항을 나타낸다.

3. 제어기 설계

차량의 제동시에 요구되는 성능은 최대한 제동거리, 횡방향 안정성, 조향능력 등이다. 그러나, 주행중인 차량에 제동력을 가했을 때 차륜이 노면 위를 미끄러지는 차륜잠김이라고 하는 현상이 발생하여 제동시 안정성이 감소하게 된다. ABS는 이러한 차륜의 잠김을 피하기 위해 차량과 차륜의 속도를 이용해서 잠김의 정도를 나타내는 식 (12)의 슬립율을 계산하여 노면의 마찰계수에 따라 제동력을 제어하여 최적의 제동방향 마찰계수를 가지도록 슬립율을 제어하는 시스템이다.

$$\lambda = \frac{V - R\omega}{V} \times 100(\%) \quad (12)$$

여기서, λ는 슬립율, V는 차체의 속도[m/s], R은 차륜의 유효반경[m], ω는 차륜의 각속도[rad/s]를 나타낸다.

최대의 제동력, 즉 최대의 마찰계수를 얻기 위해서는 일반적으로 마찰계수에 해당하는 슬립율 5~20%의 범위가 ABS 제어목표 영역으로 설정된다. ABS의 작동으로 이 영역에서 차량의 안정성이 확보될 수 있음을 검증하기 위해 본 논문에서는 PID 제어와 Fuzzy 제어를 적용한 ABS제어기를 다음과 같이 설계하였다.

3.1 PID 제어기

기준 슬립율(λ=20%)과 현재 슬립율의 오차를 입력으로 하여 오차신호에 적합한 비례, 적분, 미분 이득(gain)을 구하여 PID 제어기를 설계하였다.

운전자에 의해 제동압력이 8.5 bar로 일정하게 유지될 때, PID 제어기가 Duty율을 제동 시스템의 입력으로 받아 노면조건에 맞도록 제동토크를 발생하게 한다. 그림 3은 PID 제어기를 갖는 차량의 전체 시스템의 블록도를 나타낸다.

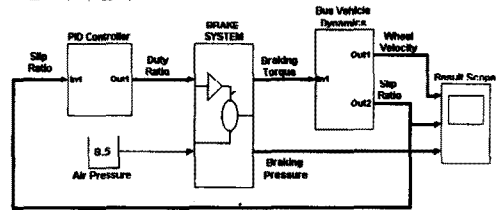


그림 3. Block Diagram of PID Controller

3.2 Fuzzy 제어기

Fuzzy 제어기는 Slip의 변화에 따른 적절한 제동력을 퍼지룰에 의해 결정하는 제어기이다. PID 제어기는 차종에 따라서 제어기의 많은 파라메타를 미세 조정해야 하고 안정성을 보장하는 매개변수의 값을 구하기가 쉽지 않지만, Fuzzy 제어기는 제어대상의 정확한 수학적 모델링 없이 입력력 관계만으로 제어가 가능하며 외란에 대해 매우 강한 특성을 갖는 장점이 있다. 제안된 Fuzzy 제어기는 슬립율과 차륜의 가속도를 입력변수로 해서 각각 5개의 언어집합을 사용하고, Duty율을 출력변수로 하여 7개의 언어집합을 사용하여 25개의 룰로 구성하였다. 그림 4는 Fuzzy 제어기가 사용된 전체 차량 시스템의 구성도를 나타낸다.

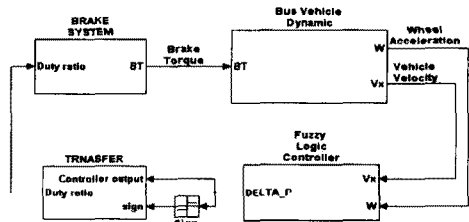


그림 4. Block Diagram of Fuzzy Controller

4. 시뮬레이션

본 논문에서는 자체 구성한 14자유도의 차량모델을 적용해서 Matlab/Simulink를 이용한 시뮬레이션을 수행하였다. 제어대상 차량은 중형 버스(BS-106)를 기준으로 하였으며, 상세한 제원은 표 1과 같다.

표 1. Vehicle Parameters

| | |
|-------------------------------------|---------------------------|
| vehicle mass | 9584kg |
| moment of inertia(I _{xx}) | 9561kgm ² |
| moment of inertia(I _{yy}) | 85100kgm ² |
| moment of inertia(I _{zz}) | 84300kgm ² |
| vehicle height(to C.G) | 1.648m |
| wheel base | 5.2m |
| wheel inertia (front/rear) | 18.9/37.8kgm ² |
| tread (front/rear) | 2.05/1.85m |
| wheel radius | 0.53m |
| air pressure | 0~8.5bar |

시뮬레이션 조건으로는 노면의 마찰계수가 0.15인 젖은 도로상태이고, 버스 타이어의 모델링 수식 대신 그림 5와 같은 수직하중에 따른 슬립율과 구동력의 변화를 트럭용 타이어 실험 데이터를 이용하여 만든 Look-up Table을 사용하였다. 이러한 조건에서 60 km/h로 직진주행시 급제동이 가해질 때의 제동특성을 분석하였다.

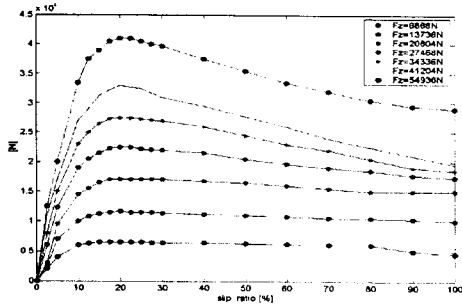


그림 5. Slip Ratio vs. Tractive Force

그림 6은 ABS를 장착하지 않은 차량(Conventional Brake System : CBS)에 대한 제동특성을 나타내고, 최대 압력 8.5 bar가 가해졌을 때 전후방 차륜이 약 0.5초만에 잠김상태가 되어 차량이 미끄러지며, 전륜이 후륜보다 먼저 잠김상태가 되고, 전체적인 제동시간이 길어짐을 볼 수 있다.

그러나, PID 제어와 Fuzzy 제어를 적용한 ABS 제어가 부착된 차량은 그림 7, 8에서와 같이 제어를 하지 않을 때보다 제동시간이 짧아지고, 슬립율도 목표치인 0.2를 추종하고 있어 안정성에서 훨씬 우수함을 알 수 있고, 미끄러운 노면에서는 차륜의 속도에 따라 제동압력이 민감하게 제어됨을 볼 수 있다. 동일한 조건에서는 PID 제어가 Fuzzy 제어기에 비해 우수한 성능을 나타내었지만, PID 제어의 경우 제어가 수행되는 동안 지속적으로 최대 마찰력이 발생하는 최적 슬립율을 정확하게 알고 있다는 가정 하에서만 유효하기 때문에 최적의 슬립율을 추정하기 위해서는 별도의 관측기가 필요하다. Fuzzy 제어기의 경우, 다양한 노면조건에서 일정한 제어성능을 발휘할 수 있지만, 차륜 회전속도에 진동이 발생함을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 공기압식 제동 시스템의 중형 버스를 대상으로 하여 14자유도 차량모델을 구성하였고, ABS 제어에 의한 제동성능을 확인하기 위하여 PID 제어기와 Fuzzy 제어기를 설계하여 시뮬레이션을 수행하였다. 전자는 목표 슬립율을 잘 추종하고, 후자의 경우 노면상태에 관계없이 일정한 제어성능을 발휘하는 장점이 있다.

향후 14자유도 차량모델을 이용하여 자체적으로 개발한 ABS 제어 알고리즘을 검증할 예정이다. 또한, 본 논문에서 충분히 고려하지 않은 타이어의 마찰특성에 대한 실험적 자료가 차후에 보강되어야 할 것으로 사료된다.

본 연구는 민간겸용기술사업(Dual Use Technology Program) 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 서명원, 김대기, 여지환, 석창성, 김영진, 이재천, "ABS 차량의 동특성 해석을 위한 차량모델 개발", 한국자동차공학회 논문집, 제7권 2호, pp. 228-241, 1999.
- [2] 김중배, "ABS의 실시간 시뮬레이터 개발", 한국자동차공학회 논문집, 제7권 7호, pp. 229-241, 1999.
- [3] H. Schurr and A. Dittner, "A New Antiskid Brake System for Disc and Drum Brake", SAE Paper No. 840468, 1984.
- [4] E. Siegert, et al., *Automotive Brake System*, BOSCH, 1995.
- [5] Thomas D. Gillespie, *Fundamental of Vehicle Dynamics*, SAE Inc., 1994.

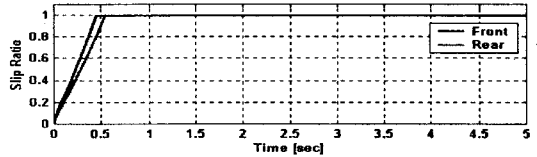
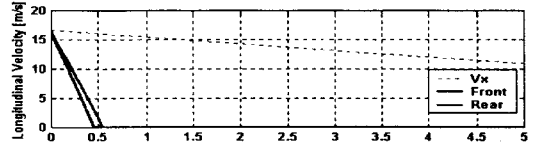


그림 6. CBS Performance on Wet Road during Straight Braking

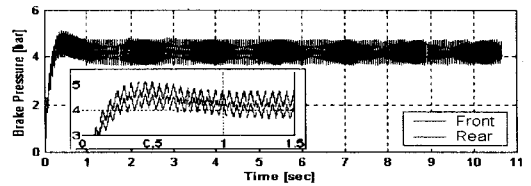
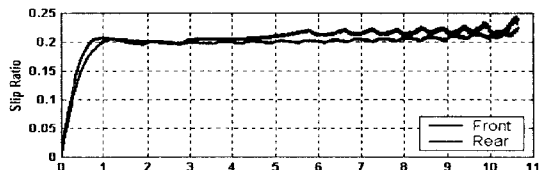
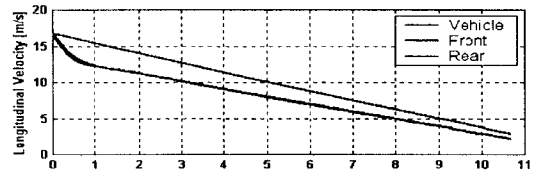


그림 7. ABS Performance with PID Controller

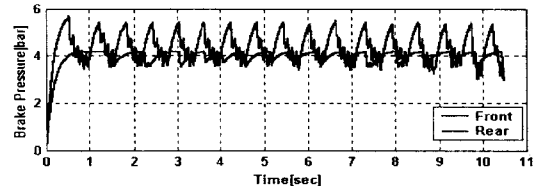
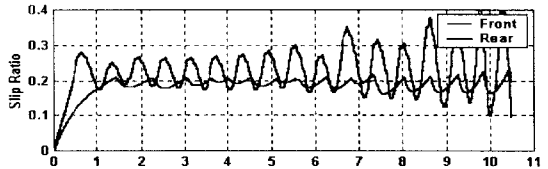
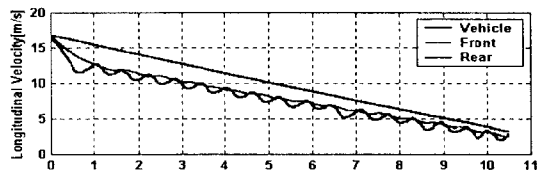


그림 8. ABS Performance with Fuzzy Controller