

전자 기계식 브레이크 차량의 승차감을 위한 제동 제어 알고리즘 개발

이종협¹⁾·최세범^{*1)}

한국과학기술원¹⁾

Braking control of electromechanical brake vehicle for improving ride comfort

Jonghyup Lee¹⁾ · Seibum Choi^{*1)}

¹⁾ Department of Mechanical Engineering, KAIST, 291, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

Abstract : 승차감은 차량의 가장 중요한 성능 지표 중 하나이다. 특히, 극한 상태에 대한 제어가 필요하지 않는 대부분의 주행상황에서는 그 중요도가 더욱 증가한다. 최근 전자 기계식 브레이크 등의 전기식 제동장치의 개발을 통해 기존 유압 제동 시스템에 비해 자유로운 제어가 가능하며, 이를 통한 승차감 제어 역시 가능하다. 본 연구에서는 제동 직전에 제동력을 줄여, 제동하는 순간의 승차감을 개선하는 것을 목표로 한다. 제동 거리의 증가를 방지하기 위해 저속상태에서 제어가 시작되며, 매우 짧은 시간 동안 제어가 이루어진다. 승차감을 높이기 위해 가속도의 변화인 저크를 통해 정의된 불쾌지수를 최소화 하는 차량 가속도의 목표 값을 정의하고, 이를 잘 따라가도록 하는 가속도 제어기의 설계가 이루어진다. 제동 명령을 정확히 따라가지 못하는 결과를 방지하기 위해 가속도의 목표 값을 갱신하는 알고리즘을 추가하여, 최종적인 제어 목표를 이루도록 설계하였다. 이 제어기의 성능을 검증하기 위해 자동차 시뮬레이터 Carsim을 통해 시뮬레이션 검증을 완료하였으며, 결과적으로 승차감이 크게 향상되는 것을 확인하였다.

Key words : Braking control(제동제어), EMB(전자 기계식 제동), Ride comfort(승차감), BBW(전기식 제동 장치), Tracking control(추치 제어)

Nomenclature

x : longitudinal position m
 v : velocity, m/s
 a_x : longitudinal acceleration, m/s²
 j_x : longitudinal jerk, m/s³
 t : time, s
 t_i : initial time, s
 t_f : final time, s
 C : discomfort index, -
 T : torque, N·m
 k : proportional constant, -

i_q : motor current, A
 F_{cl} : clamping force, N
 θ : motor position, rad
 ω : motor angular speed, rad/s

Subscripts

d : desired
 m, f, L : motor, friction, load

* 이종협, sonic_92@kaist.ac.kr.

1. 서론

차량의 제동 및 선회에 관한 대부분의 제어 연구는 위험한 상황에서 차량의 안전성을 향상시키기 위해 수행된다. 그러나 대부분의 주행상황은 차량의 극한 성능을 요구하지 않는 위험하지 않은 주행 상황이다. 또한 자율주행 차량이 적극적으로 연구되면서 차량의 극한 상황에 대한 성능 요구가 더욱 감소될 것으로 예상된다. 이러한 위험하지 않은 주행상황에 대해서는 차량의 승차감이 가장 중요한 성능지표이다. 실제로 휠체어와 엘리베이터와 같은 사고 확률이 매우 낮은 시스템에 대해 승차감을 극대화 시키는 형태의 연구가 진행된 바 있다^{1),2)}. 차량에 전자 기계식 브레이크 시스템(EMB)와 전자 웨지 브레이크(EWB)등 전기식 제동장치(BBW)에 대한 연구가 진행되면서 보다 다양한 상황에 대한 제동 제어가 가능하며, 드라이버의 입력과 별도의 제어 입력을 줄 수 있는 장점을 가지게 된다³⁾.

불쾌한 승차감은 가속도 및 가속도의 변화 량인 저크에 의해 발생한다. 차량 내 승객은 차량의 가속도로 인해 관성력을 받게 되기 때문이다. 가속도의 크기가 크거나 저크의 크기가 크면, 차량 내 승객은 큰 관성력을 받거나 계속해서 변화하는 관성력을 받기 때문에 그로 인한 불쾌함을 느끼게 된다. 본 연구에서는 제동 상황에서 승객의 불편함을 최소화 시키는 제동 제어를 구현하였다. 저크를 통해 표현되는 불쾌지수를 정의하고, 이를 최소화 하는 가속도 궤적을 계산한다. 또한 차량이 설계한 가속도 궤적을 따라 제동 할 수 있도록 트래킹 제어 알고리즘을 설계하였다.

2. 제어 목표

차량 내 승객은 차량의 가속도로 인한 관성력을 받으며, 이 관성력이 승객의 불편함을 유발시키는 가장 큰 요소이다. 특히 제동 상황에서 이러한 불편함이 가장 큰 순간은 다음과 같다. 먼저, 제동이 시작될 때 차량의 진행방향으로 관성력이 발생하는 순간과, 차량이 정지하는 순간에 진행방향의 관성력이 갑자기 사라지면서 뒤로 갑자기 몸이 쫓겨지는 형태의 불편함이다. 차량의 제동 거리는 차량의 제동 시작 시점에 매우 큰 영향을 받기 때

문에 제동 시작 상황에서 승차감을 위한 제어를 진행하는 것은 불가능하다. 하지만 차량이 거의 정지한 제동 막바지의 경우, 차량의 속도가 매우 낮아 제동 거리에 큰 영향을 주지 않는다. 따라서 본 연구에서는 차량이 정지하기 직전에 제동 제어를 하는 것을 목표로 한다. Fig.1 에 표현된 바와 같이 차량이 정지하는 순간, 차량과 노면 사이의 상대 운동이 갑자기 사라지면서, 가속도 역시 0으로 변화한다. 그로 인해 매우 큰 크기의 저크가 발생하며, 이는 승객으로 하여금 아주 큰 불쾌감으로 다가온다. 따라서 Fig.2 에 표현된 바와 같이 정지하기 직전에 제동 입력을 서서히 줄여가며 제동을 하게 될 경우 차량이 정지하는 순간 발생하는 큰 저크를 피할 수 있다. 이를 위해서는 차량의 속도와 가속도가 동시에 0으로 수렴해야 하며, 이를 위한 정밀한 제어가 필요하다.

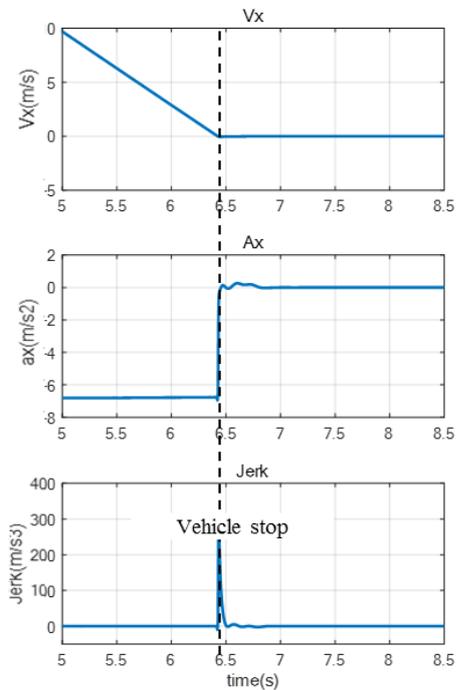


Fig. 1 일반적인 제동 시 차량의 속도, 가속도, 저크

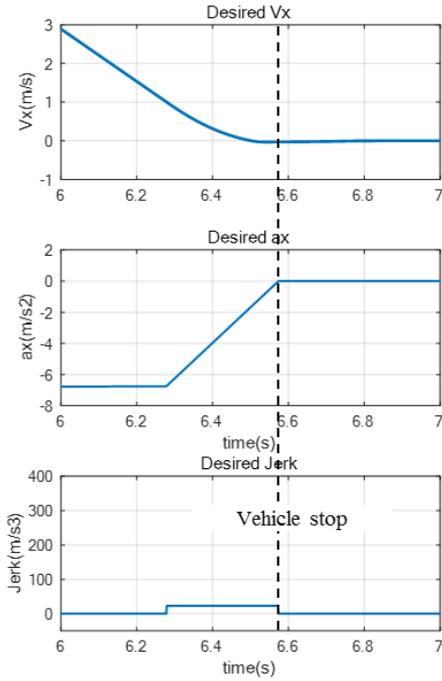


Fig. 2 승차감이 개선 된 차량의 제동

3. 제어기 설계

제어기의 전체적인 구조는 아래와 같다. 먼저, 승차감을 앞서 제시한 제어 목표를 달성하기 위한 종방향 가속도의 실시간 목표치를 계산한다. 그리고 이를 PI 제어기를 통해 트래킹 제어를 위한 제어 인풋을 결정하고 액츄에이터와 플랜트에 의해 구현되는 형태이다.

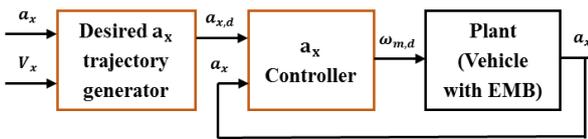


Fig. 3 전체 제어기 구조

3.1 종 방향 가속도 목표치 정의

객관적인 승차감 평가를 위해 다음과 같이 저크의 제곱 평균 형태로 설계된 불쾌지수를 활용하였다⁴⁾.

$$C = \int_{t_i}^{t_f} \left(\frac{d^3 x}{dt^3} \right)^2 dt \quad (1)$$

이 불쾌지수를 최소화 하기 위해 차량의 가속도와 속도가 동시에 0으로 수렴해야 하며, 최대한 동일한 값을 가지는 것이 유리하다. 이 조건을 충족하는 종방향 가속도의 목표치는 다음과 같이 정의된다.

$$a_{x,d}(t_f) = 0, \quad v_{x,d}(t_f) = 0 \quad (2)$$

$$\int_{t_i}^{t_f} \frac{d^3 x_d}{dt^3} dt = a_{x,d}(t_f) - a_x(t_i) = -a_x(t_i) \quad (3)$$

$$j_{x,d}(t) = \frac{d^3 x_d}{dt^3} = const. \quad (4)$$

$$a_{x,d}(t_f) = a_x(t_i) + j_{x,d} \cdot (t_f - t_i) = 0 \quad (5)$$

$$v_{x,d}(t_f) = v_x(t_i) + a_x(t_i) \cdot (t_f - t_i) + \frac{1}{2} j_{x,d} \cdot (t_f - t_i)^2 = 0 \quad (6)$$

$$j_{x,d} = \frac{a_x(t_i)^2}{2v_x(t_i)} \quad (7)$$

$$a_{x,d}(t) = a_x(t_i) + j_{x,d} \cdot (t - t_i) \quad (8)$$

만일 가속도의 목표치를 정확히 트래킹하여 제어가 될 경우 Fig.2에 표현된 형태의 거동을 보이며 이 때의 불쾌지수는 아래와 같이 현저히 감소하게 된다.

Table 1 이상적인 제어 상황에서의 불쾌지수

	Discomfort index
w/o control	3254
Ideal control	153

3.2 시스템 모델링 및 종방향 가속도 제어기

본 연구에서는 전자 기계식 브레이크 시스템(EMB)를 통한 제동 제어가 이루어 졌다. 이는 기존의 유압을 통해 피스톤을 움직이는 브레이크를 대체하여 모터를 통해 브레이크에 힘을 가하는 시스템이다. 일반적인 DC 모터가 사용되며, 내부 다이내믹스는

식 (9)-(11)과 같이 표현된다⁵⁾.

$$T_m = k_1 i_q \quad (9)$$

$$J \dot{\omega} = T_m - T_f - T_L \quad (10)$$

$$F_{cl} = k_2 \theta \quad (11)$$

이를 통해 EMB의 클램핑력을 제어하기 위한 모터의 속도가 계산되며, Fig.4과 같이 PI 제어기와 내부 전류 제어기를 통해 구현된다.

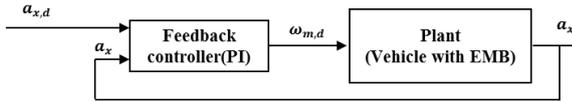


Fig. 4 종방향 가속도 제어기 구조

차량의 가속도는 EMB 모터의 위치와 비례하기 때문에 EMB 모터의 각도 제어는 PI 제어기를 통해 목표 가속도를 따라가도록 제어된다.

3.2 종 방향 가속도 목표치 갱신 알고리즘

본 연구의 목표는 차량이 정지할 때 승차감을 최대한 좋게 하기 위해 종 방향 속도와 가속도가 동시에 0으로 수렴하는 것이다. 3.1절에서 소개된 목표치를 완벽히 따라간다면, 승차감을 극적으로 개선할 수 있으나, 모터 내부 제어기와 PI제어기에서 발생하는 Phase lag, 그리고 주변에서 발생하는 다양한 불확실성 인자들로 인해 정확히 목표치를 따라갈 수 없다. 따라서 제어가 시작될 때 목표치를 한번만 정의하는 것이 아닌, 실시간으로 차량의 상태를 기반으로 새로운 목표치를 설정하는 형태의 알고리즘을 구현하여 최종적인 제어 목적을 이루도록 하였다.

본 연구에서는 GPS의 신호가 들어오는 5Hz를 기준으로 목표치를 갱신하도록 하였으며, 제어기는 새로운 목표치를 따라가기 위한 제어를 시행한다.

4. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션을 위해 Matlab Simulink를 통해 알고리즘을 구현하였으며, 차량 시뮬레이터인 Carsim을 활용하여 검증을 진행하였다. 시뮬레이

션 시나리오는 차량이 일정 가속도로 감속하다가 1m/s인 순간에 승차감을 위한 제어가 시작되도록 하여 진행하였다.

Fig.5는 제어가 시작되는 시점에 목표치를 정해 두고 갱신 알고리즘을 활용하지 않았을 때의 결과이다. 제어기의 Phase lag로 인해 원하는 목표치보다 약간 더 큰 가속도로 감속하였으며, 그로 인해 정지하는 순간 매우 큰 크기의 저크가 발생하였다. 하지만 목표치 갱신 알고리즘이 적용되어, 목표치가 50ms마다 새롭게 정의 되면, Fig.6과 같이 발생한 제어 오차를 바로잡아가며 제어가 진행되기 때문에 최종적으로 정지하는 순간에 저크가 크게 발생하지 않는 것을 확인 할 수 있다. 각 알고리즘의 블레이크수는 표 2와 같다.

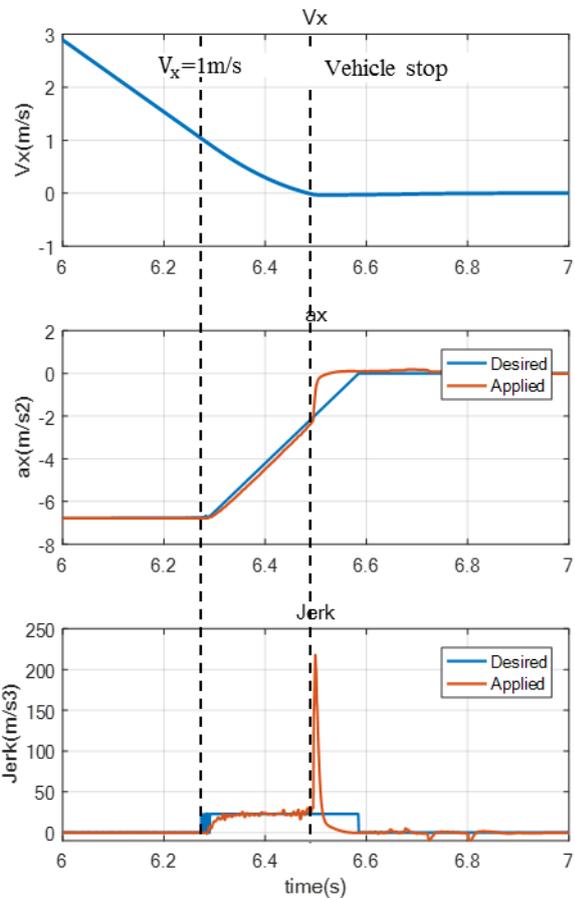


Fig. 5 갱신 알고리즘 없을 때의 제어 결과

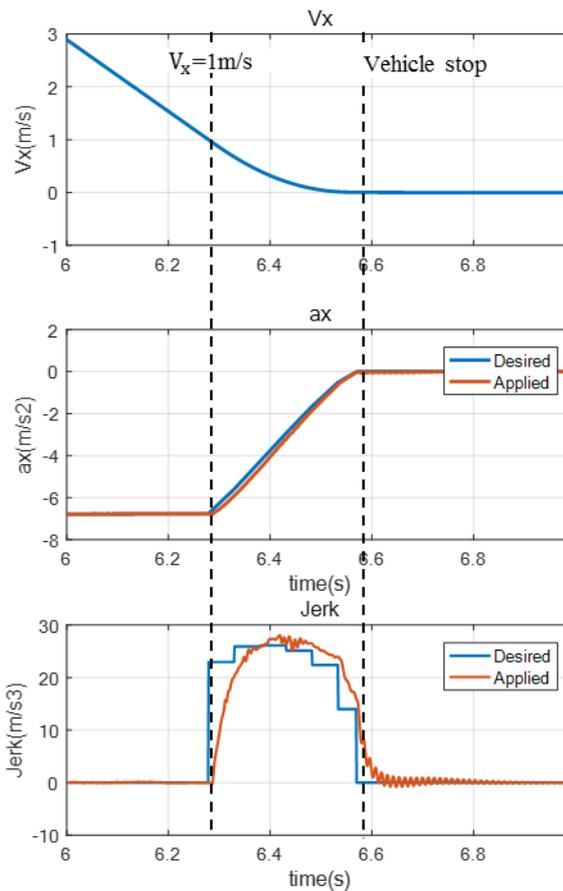


Fig. 6 최종 제어 결과

Table 2 제어를 통한 불쾌지수 변화 비교

	Discomfort index	Max jerk
w/o control	3254	718
Ideal control	153	23
Without update algorithm	423	217
With update algorithm	175	31

제어가 이루어 지지 않은 상황에는 정지하는 순간의 저크로 인해 매우 큰 불쾌지수값과 최대 저크 가진다. 목표치 갱신 알고리즘이 없는 경우 역시 정지하는 순간 발생하는 저크로 인해 불쾌지수와 최대 저크가 크게 발생하였다. 하지만, 목표치 갱신 알고리즘이 적용된 알고리즘의 경우, 매우

부드러운 정지를 통해, Fig.2 과 표 1에 표현된 물리적 최대 성능과 견주어 비슷한 성능을 보였다. 본 연구에서 제안한 알고리즘의 최대 단점은 제동거리의 증가이다. 하지만, 제동이 거의 끝나가는 시점에 제어가 시작되기 때문에 제어가 이루어지지 않은 경우에 비해 제동거리가 2cm 짧게 증가하였다.

5. 결론

승객의 승차감을 개선하는 제동 제어를 위해, 차량의 정지 직전 브레이크 입력을 감소시키는 알고리즘을 설계하였다. 저크의 크기를 통해 정의된 불쾌지수를 최소화 하는 가속도 목표치를 정의하였다. 또한 PI 제어기 기반의 가속도 제어 알고리즘과 EMB 내부 제어 알고리즘을 설계하였다. 컨트롤러의 특성상 필연적으로 발생하는 Phase lag와 다양한 불확실성 인자들로 인해 발생하는 제어 오차를 보상하기 위해, 목표치가 갱신되는 알고리즘을 추가하였다. 시뮬레이션 검증 결과 제어가 이루어지지 않았을 때에 비해 극적으로 승차감이 개선되었으며, 목표치 갱신 알고리즘의 필요성에 대한 분석 역시 완료되었다. 본 연구에서 개발한 알고리즘의 단점인 제동거리의 증가 역시 2cm 수준으로 발생하였으며, 위험상황에 대한 인지 알고리즘이 추후 추가된다면, 실제 차량에서의 활용 가능성 역시 매우 크다고 판단된다.

후기

이 논문은 한국 교육부가 후원하는 NRF를 통한 BK21+ 프로그램의 지원을 받아 수행된 연구임. 본 연구는 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2017R1A2B4004116). 이 논문은 2018년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술평가관리위원회의 지원을 받아 수행된 연구임(No.10084619, 항복강도 60kPa급 MR물질을 활용한 차량용 속업소버(댐퍼) 및 엔진 마운트 개발)

References

- 1) H Seki, K Ishihara, S Tadakuma, " Novel Regenerative Braking Control of Electric Power-Assisted Wheelchair for Safety Downhill Road Driving" , IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume: 56, Issue: 5, May 2009
- 2) Jun-Koo Kang and Seung-Ki Sul, "Vertical-vibration control of elevator using estimated car acceleration feedback compensation," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 47, no. 1, pp. 91-99, Feb 2000
- 3) Giseo Park, Seibum Choi, Dongyoon Hyun, "Clamping Force Estimation Based on Hysteresis Modeling for Electro-Mechanical Brakes" International Journal of Automotive Technology, Volume 18, No. 5, pp. 883-890, 2017
- 4) T Flash, N Hogan, "The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model" , Journal of Neuroscience, 1 July 1985, 5 (7) 1688-1703
- 5) C Line, C Manzie, MC Good, J Nell, P Rieth, "Electromechanical Brake Modeling and control" , IEEE Transactions on Control Systems Technology, Volume: 16, Issue: 3, May 2008