

전류 센서를 이용한 전자 제어식 주차 브레이크 시스템의 제동력 추정 기법

이원구*, 이영옥*, 장민석*, 이충우*, 정정주*, 정한별**
한양대학교*, (주)만도**

Braking Force Estimation for Electric Parking Brake (EPB) System Using Current Sensor

Wongoo Lee*, Young Ok Lee*, Minseok Jang*, Choong Woo Lee*, Chung Choo Chung*, Han Byul Chung**
Hanyang University*, Mando**

Abstract - 기존의 EPB 시스템에서는 제동력을 측정하기 위하여 hall effect force 센서를 이용하고 있지만, 이 센서는 비싼 가격과, 구조상 장착의 어려움 등의 문제점을 가지고 있다. 본 논문에서는 hall effect force 센서에 비해 저가이며, 기구적인 면에서 단순한 구조를 가지는 전류 센서만을 이용하여, 모터 유도 전류와 각가속도 정보를 획득하고, 이것을 이용하여 EPB 제동력을 추정하는 기법을 제안하고 실험을 통해 검증한다.

1. 서 론

최근 자동차 산업에서는 사용자의 편의를 강조하는 지능형 자동차에 대한 관심이 높아가는 가운데 전자식 센서, actuator, ECU(Electric Control Unit)등을 이용하는 X-by-wire 시스템에 대한 연구 개발이 활발히 진행되고 있다[1]. X-by-wire 시스템은 기존의 기계적 링크 시스템을 전선(wire)을 이용한 전자 제어 시스템으로 대신하는 것을 말한다. X-by-wire 시스템을 적용할 경우 차량 시스템의 구성요소가 모듈화 되어 차량 개발 시, 개발 비용의 절감을 기대할 수 있고, 편리성 및 기능 확장의 유연성 증가 등의 효과를 가져 올 수 있을 것으로 예상되고 있다[2]. X-by-wire 시스템의 한 분야인 전자 제어식 주차 브레이크(Electric Parking Brake: EPB) 시스템은 운전자의 힘에 의해 작동되는 기존의 기계적인 주차 브레이크 시스템을 전자 제어 actuator를 이용하여 대체한 시스템이다. EPB 시스템은 제어 기법과 구조 및 다양한 추가 기능에 대한 연구가 진행 중이다[3],[4].

기존의 EPB 시스템은 파킹 케이블에 걸리는 제동력을 측정하기 위하여 hall effect force 센서를 이용하고 있다[3],[4]. 이 센서는 용수철의 변위를 측정하여 발생된 제동력을 측정한다. 하지만, hall effect force 센서의 경우 비싼 가격과, 구조의 복잡성, 장착의 어려움 등의 문제점을 가지고 있다. 따라서 hall effect force 센서 없이 EPB에서 발생하는 제동력이 측정 가능하다면, 구조와 비용적인 측면에서 기존의 EPB 시스템에 비해 큰 장점을 가질 수 있다.

본 논문에서는 EPB의 기계, 구조적 요소 및 모터 유도 전류와, 각가속도 성분을 이용하여 제동력을 추정하는 식을 유도한다. 또한 전류 센서만을 이용하여 각가속도 정보를 획득할 수 있는 방법을 모색하고[5], 이것을 이용하여 전류 센서만으로 브레이크에 인가되는 제동력을 추정하는 기법을 제안한다. 또한, 모의 실험을 통해 EPB 시스템의 정상 상태 및, 와이어 노화가 발생한 경우를 가정하여, 제동력 추정 기법의 유효성을 검증한다. 마지막으로 EPB test rig를 이용한 실제 실험을 통해 초기 부하의 유무에 관계없는 절대적인 제동력 추정이 가능성을 확인하고, 반복 실험을 통해 제동력 추정 기법의 성능을 검증한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 제동력 추정 기법에 대해 설명한다. 3절에서는 모의실험을 통하여 제동력 추정기법을 검증하고, 4절에서는 실제 실험을 통해 제동력 추정 기법의 성능 평가를 실시한다. 그리고 5절에서는 결론을 제시한다.

2. EPB용 Sensorless 제어 기법 개발

2.1 모터의 유도 전류와 각가속도를 이용한 제동력 추정

EPB 시스템에 사용되는 DC모터 출력 토크는 모터 자속 밀도가 포화되지 않는 한 모터의 유도 전류에 비례한다. 즉,

$$T_m = K_m I_m \tag{1}$$

여기에서 T_m 은 모터의 출력 토크, K_m 은 모터 토크 상수, I_m 은

모터의 유도 전류를 나타낸다. 모터의 유도 전류로부터 EPB 시스템의 apply force를 추정하기 위해, 다음과 같은 수식을 사용한다[6].

$$T_m = T_a + T_i + T_f \tag{2}$$

T_a 는 EPB 시스템의 apply 토크, T_i 는 이너서 토크, T_f 는 frictional resistance 토크를 나타낸다. 이너서 토크 T_i 는 모터의 각 가속도($\dot{\omega}$)와 이너서 J_t 에 비례한다. 또한 T_a 는 제동력 F_a 에 비례한다. 즉, $T_a = Y_t F_a$ 이다. 여기서 Y_t 는 screw gain과 gear ratio에 의해 결정된 상수이다[7]. 따라서 다음과 같은 수식을 얻을 수 있다.

$$K_m I_m = Y_t F_a + J_t \dot{\omega} + T_f \tag{3}$$

이것을 F_a 에 대하여 정리하면 수식 (4)와 같은 결과를 얻는다.

$$F_a = (K_m I_m - J_t \dot{\omega} - T_f) / Y_t \tag{4}$$

여기서 T_f 는 viscous friction T_v 와, coulomb friction T_c 의 합으로 나타낼 수 있다. 즉,

$$T_f = T_v + T_c \tag{5}$$

EPB 시스템의 스크류는 coulomb friction에 비해 매우 작은 viscous friction을 가지고 있다. 즉, $T_c \gg T_v$ 이므로, $T_f \cong T_c$ 이다 [8]. 따라서 F_a 는 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$F_a = (K_m I_m - J_t \dot{\omega} - T_c) / Y_t \tag{6}$$

여기서 T_c 는 부하(제동력) F_a 에 비례하는 μ 항과 상수 offset 항으로 이루어져있다[9],[10]. 즉,

$$T_c = \mu F_a + \alpha \tag{7}$$

식(7)을 식(6)에 대입하여 정리하면, 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$F_a = \frac{K_m I_m - J_t \dot{\omega} - \alpha}{Y_t + \mu} \tag{8}$$

여기서, K_m , J_t , Y_t 와 μ , α 는 EPB plant의 구조와 모터의 물리적 특성에 의해 결정되는 상수항으로 이미 알고 있는 값이다. 따라서, 모터의 유도 전류 I_m 과 각 가속도 $\dot{\omega}$ 를 안다면, 이를 이용하여 제동력 F_a 를 추정 할 수 있다.

2.2 전류 리플을 이용한 각가속도 및 제동력 추정

각 가속도 $\dot{\omega}$ 를 얻기 위해서는 엔코더나 가속도계 등을 사용한다. 하지만 이 경우 추가적인 비용이 발생되고, EPB 시스템은 구조적으로 복잡하게 된다. 따라서 본 논문에서는 추가적인 센서 없이 모터의 각 가속도를 추정하는 센서리스 위치 제어 기법을 이용하고자 한다. Consoli 등은 DC 모터의 1회전 마다 발생하는 리플의 파형이 반복되는 점에 착안하여 전류 리플을 카운팅하고 이를 이용하여 회전각을 추정하는 기법을 제안하였다[5]. DC 모터에서 발생하는 전류 리플 주파수는 모터의 회전속도와 slot의

개수에만 영향 받으며, 식(9)와 같이 표현된다.

$$\omega_r = N_T \omega \quad (9)$$

여기에서 ω_r 는 전류 리플의 주파수를, N_T 는 모터 회전자의 slot 개수를, ω 는 모터의 회전 속도를 의미한다[5]. 수식(9)를 ω 에 대하여 정리하여 수식(8)에 대입하면 다음과 같은 수식(10)을 얻을 수 있다.

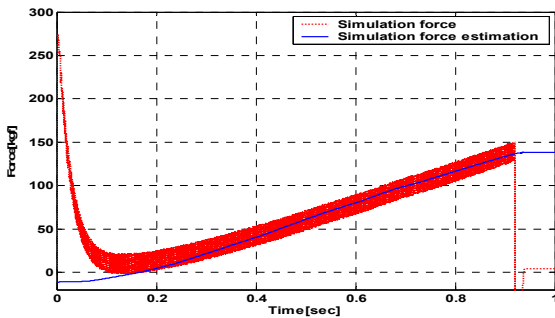
$$F_a = \frac{K_m I_m - J_t \frac{\omega_r}{N_T} - \alpha}{\gamma_t + \mu} \quad (10)$$

수식(10)을 이용할 경우 전류 센서에서 측정된 모터의 유도 전류와 전류 리플 주파수를 이용하여 제동력 추정 가능성이 가능하다.

3. 모의실험을 통한 제동력 추정 기법 검증

3.1 정상 상태의 경우 제동력 추정 결과

전류 센서를 이용한 제동력 추정 기법을 검증하기 위하여, Dymola와 MATLAB Simulink를 이용하여 모의실험을 진행하였다. EPB 시스템의 기계적인 요소는 Dymola를 이용하여 모델링하였고, 각각속도 및 제동력 추정 결과를 생성하는 블록은 MATLAB Simulink를 이용하여 구현하였다. 제안된 제동력 추정 기법을 검증하기 위하여, 정상상태에서 약 0.9초 동안 전압을 가했을 때 실제 제동력이 모터 유도 전류와 전류 리플을 이용해 추정된 제동력과 일치하는지 확인해 보았다.

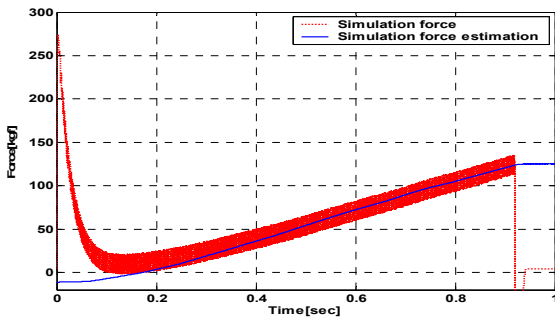


<그림 1> 정상 상태에서의 모의실험 결과

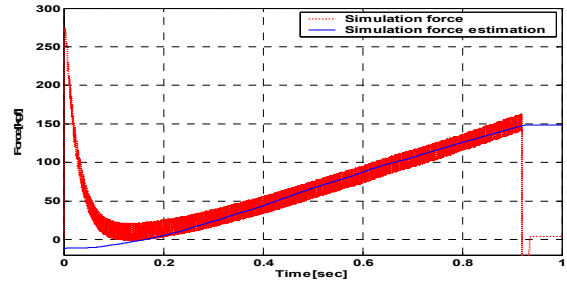
그림 1은 정상 상태에서의 모의 실험 결과이다. 모의 실험 결과 실제 제동력과 추정된 제동력 값이 추정 제동력의 최소점 부근부터 일치하는 것을 확인할 수 있다. 초기 오차는 모터 구동 초기에 발생하는 inrush 전류 때문에 생기는 오차이다. 따라서 모터 구동 초기의 inrush 구간에서는 full power로 구동하고 inrush구간 이후 즉, 추정 제동력의 최소점 부터 제동력을 제어한다. EPB의 관심 대상은 target force 부근의 제동력 제어이기 때문에 초기에 발생하는 오차는 문제가 되지 않는다.

3.2 와이어 상수 변화에 따른 제동력 추정 결과

EPB 시스템은 온도 변화 및 와이어의 노화로 인해 와이어 상수의 변화가 발생하는 경우에도 신뢰성 있는 제동력 추정이 필요하다. 제안된 제동력 추정기법은 와이어 상수와 독립적이기 때문에 와이어의 노화가 진행된 경우에도 정확한 제동력 추정이 가능하다. 모의 실험을 통해 이를 검증하여 보았다.



<그림 2> 와이어 상수 20%증가한 경우



<그림 3> 와이어 상수 20%감소한 경우

그림 2는 와이어 상수가 20% 감소한 경우, 그림 3는 와이어 상수가 20% 증가한 경우의 모의실험 결과이다. 실험 결과 와이어 노화와 온도의 변화 등에 따른 와이어 상수의 변화에 관계없이 신뢰성 있는 제동력 추정 결과를 얻을 수 있었다.

4 실험을 통한 제동력 추정 기법 검증

4.1 EPB 제어실험 환경

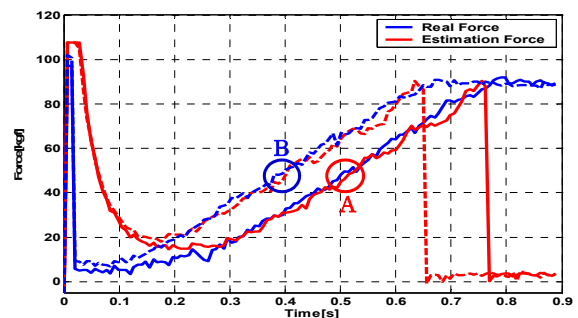
제동력 제어 실험을 위해 stretched type의 EPB 실험기를 이용하였다. 실험 구성요소는 EPB plant, PC, 오실로스코프, hall effect force 센서, 엔코더, 전류 센서, 12V 배터리, EPB 제어 보드, 인디케이터 등으로 그림 5와 같이 구성되어 있다.



<그림 4> EPB 실험 환경

4.2 실제 제동력과 추정된 제동력 비교

제안된 기법의 유효성을 실험을 통해 검증하기 위하여, 측정된 모터 유도 전류와 전류 리플을 이용해 추정 제동력을 계산하고, 이를 hall effect force 센서로 측정된 제동력과 비교하여 보았다. 한편, 제안된 기법은 모터 유도 전류와 각속도 성분을 이용하여 제동력을 추정하기 때문에, 초기 부하의 유무에 관계없이 신뢰성 있는 제동력 추정 결과를 갖는다. 이를 검증하기 위하여 초기 부하 조건을 다르게 하여 실험을 진행하였다. 초기 부하 조건은 EPB가 충분히 release되어 무부하 상태인 경우와 이미 부하가 걸려 있는 상태의 경우로 나누어 진행하였다.



<그림 5> 초기 부하의 변화에 따른 제동력 변화 비교

두 실험 모두 target force를 약 90[kgf]로 하여 진행하였다. 그림 5의 (A)는 초기 무부하인 상태, 즉, EPB 시스템의 와이어가 충

분히 release 되어있는 경우이고, (B)는 초기 부하가 걸려있는 경우이다. 각각의 실험결과 초기 조건에 관계없이 과도상태 이후, EPB 동작시간동안 추정 제동력과 실제 제동력이 일치하는 것을 확인할 수 있다.

4.3 전류 센서를 이용한 제동력 추정 기법 성능 확인

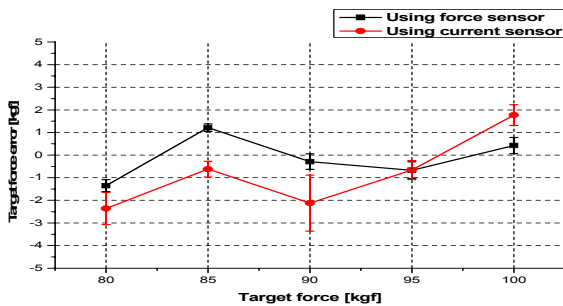
EPB 시스템의 제동력 추정 관계식을 실제 실험에 적용하여 전류 센서만을 이용한 EPB 제동력 제어의 성능을 확인하였다. 제동력 제어는 nonlinear P 제어기를 사용하였다[4]. nonlinear P 제어기의 제어신호는 식(10)과 같다.

$$u = f(e, \alpha, \delta) \quad (10)$$

$$f(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} K_{pnl}|e|^\alpha, & \forall e > \delta \\ K_{pnl}\delta^{\alpha-1}e, & \forall e \leq \delta \\ u_{min}, & \forall e \leq 0 \end{cases}$$

여기서, $\delta > 0, K_{pnl} > 0$ 이다. 실험은 각각의 목표 제동력 당 10회 반복 실시하였고, hall effect force 센서와 전류 센서를 이용한 제동력 제어의 최종 제동력은 인디케이터에서 표시된 결과를 이용하였다.

4.3.1 Apply시 실험 결과

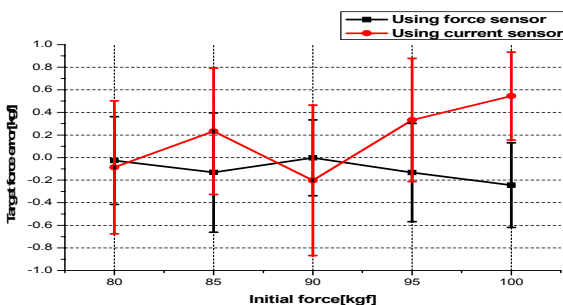


<그림 6> Apply시 target force에 대한 표준편차

(x축: Target force, y축: error 표준편차)

제동력 제어 실험은 hall effect force 센서를 사용한 경우와 전류 센서를 사용하여 제동력을 제어한 경우로 나누어 진행하였다. Target force에 대한 오차의 평균값과 표준 편차는 그림 6과 같다. 전류 센서를 이용하여 제동력을 제어한 경우도 80~100[kgf] target force에 대해 5%이내의 오차 범위 내에서 동작하는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 EPB 시스템의 허용 오차범위인 ±10% 이내를 만족하는 결과이다. 여기서, 각 target force마다 offset 오차가 발생한 이유는 EPB test rig의 구조적 특성으로 인해 생기는 전류의 저주파 진동 성분 때문이다. 이 전류의 진동 성분을 제거 할 수 있다면 보다 개선된 제동력 제어가 가능하다.

4.3.2 Release시 실험 결과



<그림 7> Release시 target force에 대한 error

(x축: 시작 force, y축: error 표준편차)

Release의 경우는 시작 force를 80~100[kgf]로 하고, target force를 0[kgf]로 하여 실험을 진행하였다. 실험 결과 그림 7과

같이 모든 시작 force에 대해 target force가 ±1[kgf] 이내의 오차 범위 내에서 동작하는 것을 확인할 수 있었다. 이상의 실험 결과를 통해 apply와 release시 모두 전류 센서만을 이용한 EPB 제동력 제어가 가능하다는 것을 확인하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 모터 전류와 각 가속도 정보를 이용한 EPB 제동력 추정 기법과, 이를 이용한 EPB force control 구현 기법을 제안하였다. EPB 제동력 추정 기법은 전류 리플을 이용해 각 가속도 정보를 추정할 경우, 전류 센서만을 이용해 제동력 추정이 가능하다. 따라서 hall effect force 센서를 이용해 force를 측정하는 것에 비해 구조적, 비용적으로 장점을 가지는 시스템을 구현할 수 있다. 모의실험과 실제 실험을 통해 제안한 기법의 성능을 평가하였다. 저가의 EPB 시스템 구현시 hall effect force 센서 없이 전류 센서만으로 구현 가능한 EPB 시스템의 가능성을 보였다.

감사의 글

본 논문은 부품·소재 기술 개발 사업(과제번호: 10014728), 그리고 2008년 BK21의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] R. Isermann, R. Schwarz and S. Stolzl, "Fault-Tolerant Drive-by-Wire Systems", In Control Systems Magazine, IEEE Volume: 22, Issue: 5, p.64-81, Oct. 2002.
- [2] Sanket Amberkar, Joseph G. D. Ambrosio and Brian T. Murray, Joseph Wysocki, Barbara J. Czerny, "A System-Safety Process For By-Wire Automotive Systems", SAE Technical Paper, vol. 2000-01-1056, 2000.
- [3] H. B. Chung, C. W. Lee, D. H. Lee, Y. O. Lee, C. C. Chung, Y. Son, P. Yoon, "A Fault Detection Method for Electric Parking Brake (EPB) Systems with Sensorless Estimation Using Current Ripples", 14th Asia Pacific Automotive Engineering Conference, Document No. 2007-01-3660
- [4] Y. O. Lee, C. W. Lee, H.B. Chung, C. C. Chung, Y. Son, P. Yoon and I. Hwang (2007), "A Nonlinear Proportional Controller for Electric Parking Brake (EPB) Systems", 14th Asia Pacific Automotive Engineering Conference, Document No. 2007-01-3657.
- [5] A. Consoli, G. Bottiglieri, R. Letor, R. Rugeri, A. Testa and S. De Caro, "Sensorless Position Control of DC Actuators for Automotive Applications", In Industry Applications Conference, 2004.
- [6] R. Hoseinnezhad, S. Saric and A. Bab-Hadiashar, "Estimation of Clamp Force in Brake-by-Wire Systems: A Step-by-Step Identification Approach", Accepted to be presented at SAE World Congress and published as SAE technical paper, Detroit, 2006.
- [7] Y. O. Lee, C. W. Lee, C.C. Chung, Y. Son, P. Yoon and I. Hwang, "Stability analysis of electric parking brake (EPB) systems with a nonlinear proportional controller," 17th IFAC World Congress, Seoul, Korea, July 6-11, 2008. to be published.
- [8] R. Schwarz, R. Isermann, J. Bohm, J. Nell, and P. Rieth, "Clamping force estimation for a brake-by-wire actuator", SAE Technical Paper, vol. 1999-01-0482, 1999.
- [9] C. Line, C. Manzie and M. Good, "Control of an Electromechanical Brake for Automotive Brake-By-Wire Systems with an Adapted Motion Control Architecture", SAE 2004 Automotive Dynamics, Stability & Controls Conference and Exhibition, May 2004, Detroit, MI, USA.
- [10] H. Olsson, K. J. Åström, C. C. d. Wit, M. Gäfvert, and P. Lischinsky, "Friction models and friction compensation", European Journal of Control, 1998.