

전자 제어식 주차브레이크(EPB)의 성능분석

김성모*, 정종렬⁺, 신창우⁺⁺, 임원식⁺⁺⁺, 차석원⁺⁺⁺⁺

(논문접수일 2011. 10. 30, 수정일 2011. 11. 22, 심사완료일 2011. 11. 23)

Performance Analysis of Electronic Parking Brake

Sungmo Kim*, Jongyeol Jeong⁺, Changwoo Shin⁺⁺, Wonsik Lim⁺⁺⁺, Sukwon Cha⁺⁺⁺⁺

Abstract

Electric Parking Brake(EPB) is the system operated by electric control actuator. It differs from the mechanical parking brake system which is operated by lever and pedal in need of human power. The EPB system is composed of DC motor, helical and differential epicyclic gear, screw, cables, and sensor. This paper describes about the EPB system mathematically and constructs a modeling of the EPB system using MATLAB/SIMULINK. Especially, SimMechanics library in SIMULINK is used to make each parts of system a module. By made modeling of the friction torque between bolt and nut. Cable tension can be maintained after the motor operating stops.

Key Words : Electric Parking Brake(전자 주차 브레이크), Cable-Puller Type(케이블 풀러형), MATLAB/ SIMULINK(매트랩/시뮬링크), Cable Tension(케이블 장력), ABS(엔티 록 브레이크 시스템), DIH(drum in hat : 케이블 풀러형)

1. 서론

전자제어식 주차 브레이크(EPB : Electronic parking brake) 시스템이란 기존의 운전자에 의해 레버 및 페달로 작동되는 기계식 주차브레이크 시스템과 달리 전자제어 액추에이터를 이용하여 제동하는 시스템이다.

이는 2001년 Renault의 Vel Satis에 처음 적용된 이후, Audi, Subru, BMW의 7시리즈, Volkswagon, 현대자동차, 기아자동차 등의 일부 차량에 적용되고 있는 시스템 이다.

EPB는 주행상태에 맞는 브레이크의 작동과 해제가 가능하고, 운전자가 키를 오프(Off)한 후에 자동작동을 통한 파킹과

도난방지가 가능하다는 편리성을 갖추고 있다.

또한, 버튼 조작만으로 작동이 되기 때문에 힘이 약한 노약자의 경우, 이용이 편리하고, 비상 제동시 ABS 브레이크의 특징을 포함하는 장점이 있다⁽¹⁾.

EPB는 크게 케이블 풀러형과 캘리퍼 일체형으로 구분된다. 케이블 풀러형은 기존 후륜 브레이크 시스템을 사용하면서, 모터와 감속기로 구성된 별도의 액추에이터를 구동시켜 주차 브레이크와 연결된 주차 케이블을 당겨주는 방식이다. 이 방식은 패키지 레이아웃 선을 고려해야 할 필요가 있다는 단점이 있다. 이와는 다르게 별도의 주차 케이블 없이 후륜에 장착된 일체형 캘리퍼 액추에이터를 이용하여 캘리퍼를 작동시키는 방식을

* 서울과학기술대학교 나노 IT 융합프로그램

+ 서울대학교 기계항공공학부

++ 서울대학교 기계항공공학부

+++ 교신저자, 서울과학기술대학교 자동차공학과

주소: 139-743 서울시 노원구 공릉2동 172 (limws@seoultech.ac.kr)

++++ 서울대학교 기계항공공학부

캘리퍼 일체형이라 한다. 이는 DIH 장치의 케이블을 삭제할 수 있어 레이아웃을 구성하기가 유리하지만 주 브레이크를 공동 설계하기 때문에 NVH(Noise Vibration Harshness) 튜닝이 필요하다는 단점이 있다^(2~4).

본 논문에서는 각 EPB 시스템 구성 부품을 수학적으로 분석하여 수식 화하고, 각 요소 별로 모델링을 하여 추후 구성요소 별로 분리 혹은 변경이 용이하도록 제작하였다. 최종적으로 제작된 모델링에서의 케이블 장력을 이용하여 제작된 모델링을 검증하고 확인하였다.

2. EPB 시스템의 수식화

2.1 EPB 시스템

본 논문은 케이블 풀러형 EPB 시스템의 수학적 분석과 모델링에 대해 다루었다. 케이블 풀러형 EPB 시스템 구성 요소로는 DC모터, 헬리컬기어형의 차동유성 기어, 스크류와 장력 및 모터구동 전류를 측정하는 센서가 있다. 특히, 다양한 EPB 구성 요소 중에서도 볼트와 너트로 구성되어 있는 스크류 부분과 그 양 끝에 연결되어 있는 케이블의 장력을 표현하는데 중점을 두었다.

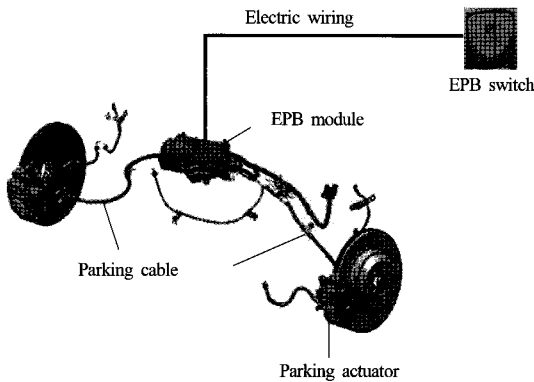


Fig. 1 Construction of EPB system

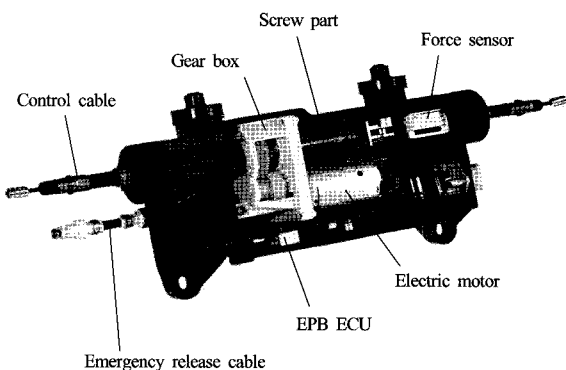


Fig. 2 Construction of module

2.2 EPB 시스템의 수식화 및 모델링

2.2.1 EPB 파워트레인

Fig. 3 은 EPB 시스템의 각 구성 부품별로 힘과 토크의 수식화를 위해 도식화한 것이다. 각 부품에 인가되는 토크, 그에 따른 속도는 모두 힘의 평형식을 이용해 수식화 하였다. 여기서, X (변위), f (힘), T (토크), k (강성), J (회전관성), m (질량), θ (각 변위)를 나타내고, 첨자로 L과 R은 각각 좌우를 나타낸다.

볼트에는 케이블에서 볼트를 당기는 힘(f_B)과 볼트와 너트 사이의 힘(f_{BN}), 그리고 볼트의 움직임에 대한 반력($f_{f,B}$)이 작용한다. 또한 모터에서 볼트에 인가하는 토크(T_B)와 볼트와 너트 사이의 회전에 따라 발생하는 마찰 토크(T_{BN})가 발생하여, 이 토크의 합이 볼트를 회전시킨다.

너트에는 볼트와 마찬가지로 케이블에서 너트를 당기는 힘(f_N)과 볼트와 너트 사이에 작용하는 힘($f_{f,N}$), 그리고 너트의 움직임에 대한 반력($f_{f,N}$)이 작용한다. 볼트와 다르게 너트는 회전하지 않는다고 가정한다.

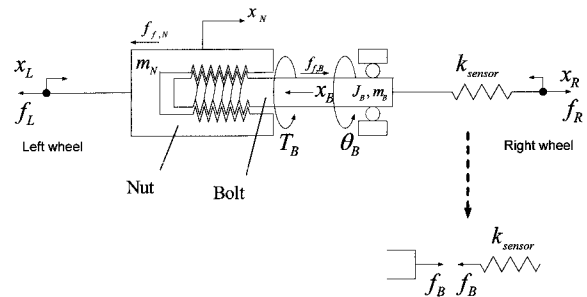


Fig. 3 Diagram of screw part in EPB system

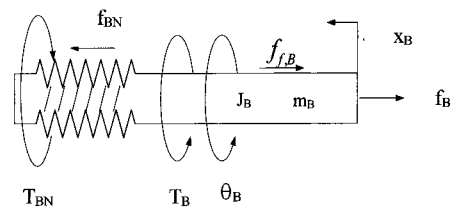


Fig. 4 Diagram of bolt

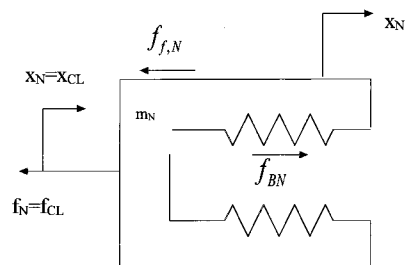


Fig. 5 Diagram of nut

2.2.2 스크류 부분

볼트에 인가되는 모터 토크 외에 볼트와 너트 사이에 작용하는 마찰 토크를 분석 및 수식화 한 것이다. 볼트가 너트에 의해 조일 때와 풀릴 때 인가되는 각 힘의 방향이 상황에 따라 달라지기 때문에 각 상황 별로 수식화 하여, 각각 다른 마찰 계수를 계산하였다.

Fig. 6은 볼트와 너트가 풀어지는 경우에 작용하는 힘의 관계를 어떤 바디(볼트)가 경사면(너트)를 올라갈 때의 형태로 등가화 한 그림이다. 따라서 다음 식을 구할 수 있다. 여기서, P와Q(하중), β(나사각도), Fn(수직하중)을 나타낸다.

$$\begin{cases} P\cos\beta = Q\sin\beta + \mu F_n \\ F_n = P_n\beta + Q\cos\beta \end{cases} \quad (1)$$

볼트가 조여지는 경우, 앞의 상황과 유사하지만 이동 방향이 달라지기 때문에 몇 가지 힘의 방향이 변화하면서 볼트가 풀리는 경우와 다른 마찰토크 상수를 갖게 된다. 이러한 각 경우를 종합하여 식으로 정리하면 아래와 같이 되며, Fig. 7은 그래프로 도식화한 것이다.

$$T_{BN} = \left(\frac{d_p}{2}\right) \cdot \gamma_{BN} \cdot f_{BN} \quad (2)$$

여기서, γ_{BN} 은 다음과 같다.

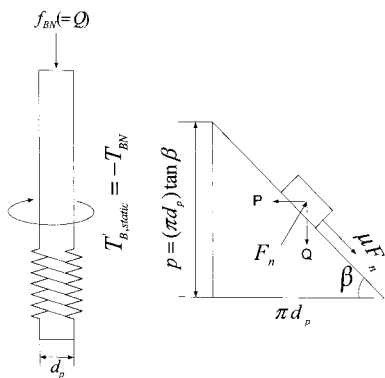


Fig. 6 Diagram of screw torque friction

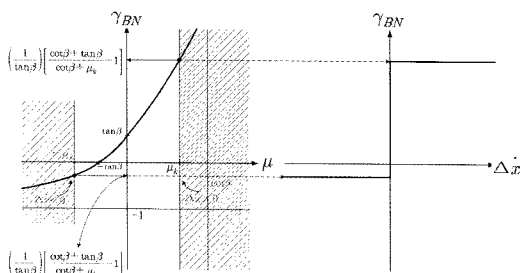


Fig. 7 Graph of gamma by case

$$\gamma_{BN} = \begin{cases} \dot{x} > 0; \left(\frac{\mu \cos\beta - \sin\beta}{\cos\beta + \mu \sin\beta} \right) \\ \dot{x} < 0; \left(\frac{-\mu \cos\beta - \sin\beta}{\cos\beta - \mu \sin\beta} \right) \\ \dot{x} = 0; unknown.. \end{cases} \quad (3)$$

2.2.3 DIH 시스템

볼트, 너트 양단에 연결되어 있는 케이블에 걸리는 장력을 스프링과 댐퍼의 형태로 표현하였다. 단, 각 변위에 따른 힘이 비선형으로 변화하기 때문에 이는 모델링 시 수식으로 표현하지 않고, 테이블 형태로 표현하였다.

Fig. 8은 볼트에 연결되어 있는 DIH 시스템의 센서 부분이다. 일정한 스프링 상수와 스프링과 댐퍼로 구성되어 있다.

Fig. 9는 x_{cr} 포인트와 x_{opr} 포인트를 연결하는 부분의 스프링과 댐퍼의 모델이다. 두 점을 연결하는 스프링 힘 f_{kcr} 의 경우, 변위에 따라 선형적으로 증가하지 않기 때문에 모델링 시 각 변위의 해당 힘을 테이블로 입력하게 된다.

Fig. 10은 x_{opr} 점과 드럼 브레이크(그라운드로 가정) 점을 연결하는 부분의 스프링과 댐퍼의 모델이다. 두 점을 연결하는 스프링 힘 f_{kopr} 의 경우 f_{kcr} 과 마찬가지로 변위에 따라 선형적으로 증가하지 않기 때문에 모델링 시 각 변위의 해당 힘을 테이블로 입력하게 된다.

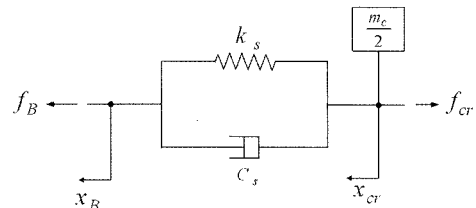


Fig. 8 DIH system bolt part 1

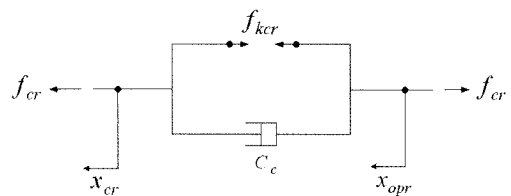


Fig. 9 DIH system bolt part 2

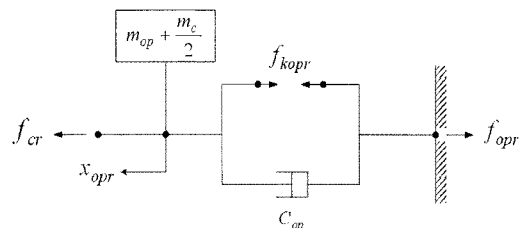


Fig. 10 DIH system bolt part 3

너트의 경우, 센서 부에 해당하는 스프링 댐퍼 모델이 없는 것을 제외하고는 볼트 부분의 수식 및 모델과 같다.

2.2.4 기어 부품

기어부분 모델링의 경우, 기어가 있음으로써 발생하는 토크의 변화와 기어효율만을 간단하게 고려하여 모델링 하였다.

3. 모델링 제작 및 해석과 검증

3.1 SimMechanics library를 이용한 모델링

SIMULINK를 이용한 모델링 제작은 SIMULINK Simscape 의 SimMechanics library를 이용하였다. SimMechanics library 는 강체와 그들의 움직임을 표현할 뿐만 아니라, 각 강체를 조인트로 연결하고, 속도와 힘을 측정하거나 입력을 줄 수도 있다. 본 논문에서는 각 부분 별 모듈화를 위하여 SimMechanics library를 이용하였다.

Fig. 11은 모델링한 전체 시스템 블록선도이다. 볼트, 너트, 좌우 케이블 및 기어가 각 부분별로 모듈화 되어 있는 것을 확인할 수 있다. 모터의 경우, 현재 별도의 블록으로 모델링 되어 있으나, 특정 모터 토크를 기어에 입력 시켜주는 것으로 시뮬레이션이 가능하다.

3.1.1 볼트와 너트

볼트와 너트의 경우, 앞서 수식화 했던 힘 평형을 이용하여 각 바디에 토크와 힘을 가해 이동시키는 방식으로 모델링하였다. 특히, 앞서 수식화 하였던 볼트와 너트 간의 마찰 토크의 경우, 볼트가 조여질 때와 풀어질 때의 마찰 계수가 달라지기 때문에 이의 모델링을 위해 μ 를 아래와 같이 변경한 후, 수식을 다음과 같이 정리하였다.

$$\mu \rightarrow \text{sign}(\Delta \dot{x})|\mu| \quad (4)$$

$$\gamma_{BN} = \left(\frac{-1}{\tan\beta} \right) \left[\frac{\mu + \tan\beta}{\mu - \tan\beta} \right] \quad (5)$$

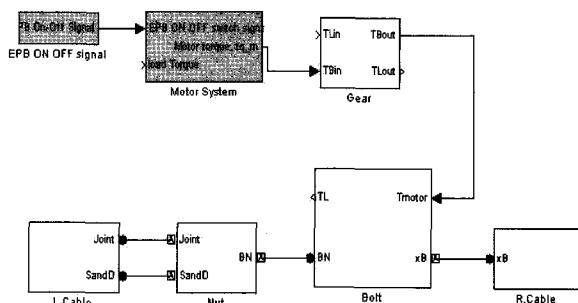


Fig. 11 Block diagram of the system

위 식을 적용하여, 마찰토크를 구하였다.

Fig.12는 볼트 시스템의 블록선도이다. 볼트에 해당되는 바디가 있으며, 모터에서 오는 토크와 볼트에서 측정된 속도 방향 및 f_B 와 같은 정보를 통해 식 (5)를 이용하여 마찰 토크 계수를 계산한다. 다시 이것을 이용하여 마찰 토크를 구한 후, 이것을 볼트에 가해지는 모터 토크와 합하여 볼트에 최종 토크를 가하는 구조이다. 너트의 경우 볼트에 가해지는 토크로 인한 움직임에 따라 변위가 발생하기 때문에, 단순히 너트에 해당되는 바디만 모델링 되어 있다.

3.1.2 DIH 시스템

좌우 EPB케이블의 경우, 앞서 모델링 한 것과 같이 볼트 측 총 3개의 스프링 댐퍼 모델, 너트 측 총 2개의 스프링 댐퍼 모델로 모델링 하였다. 하지만 SimMechanics의 스프링 모델의 경우, 선형적인 스프링 상수의 입력만이 가능하기 때문에, 기존 모델을 변경하여, 변위를 입력으로 받아 DIH 테이블에서 해당 힘이 출력으로 나올 수 있도록 블록을 변경하였다.

Fig. 13의 경우, 볼트 측 케이블의 모델이며 너트 측 케이블의 경우 Fig. 13에서 센서에 해당하는 스프링 댐퍼 모델만을 제거한 것과 같다.

3.1.3 기어

기어 파트의 경우, 모터에서 출력으로 나오는 토크를 받아 기어 비와 기어 효율로 이용해 볼트에 입력될 토크를 출력해 내는 모델링을 하였다.

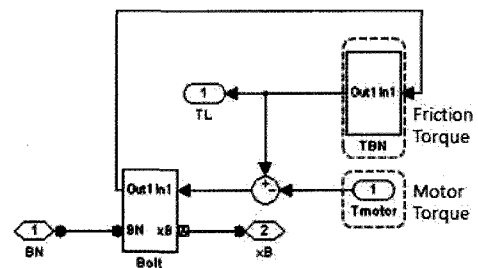


Fig. 12 Block diagram of bolt

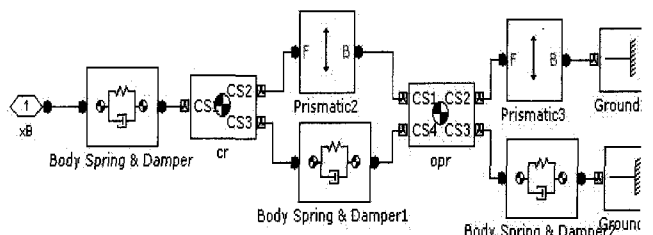


Fig. 13 Block diagram of DIH system

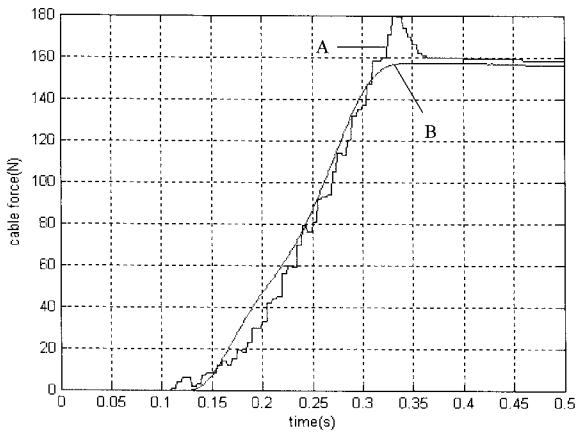


Fig. 14 Graph of cable tension

3.2 모델링의 해석 및 검증

제작된 EPB 시스템 모델에서의 케이블 장력 결과 그래프와 실제 EPB 시스템의 실험 데이터 결과를 비교 분석하여 모델링을 검증하였다.

Fig. 14는 실험을 통해 구한 케이블 장력과 시뮬레이션을 통해 구한 케이블 장력을 비교한 것이다. 실험에서는 모터가 구동됨에 따라 계속해서 케이블 장력이 커지다가, 모터의 구동이 정지됨에 따라 순간적으로 장력이 약 10% 정도 떨어진 후 블트와 너트가 풀어지지 않고 유지되는 것을 확인할 수 있다. 하지만 시뮬레이션에서는 모터 정지 시의 순간적인 장력 강하가 표현되지 않고 케이블 장력이 유지되는 것을 볼 수 있다. 해석의 목적이 EPB의 제동력 분석인데, 제동력은 EPB 장력에 비례한다고 볼 수 있다. EPB 제어는 장력 제어 영역이 넓고 중요하기 때문에 제동력 비교 대신에 장력을 비교하였다. Fig. 14에서 A는 실험값이며, B는 모델링 값이다.

4. 결론

본 논문에서는 케이블 풀리형 EPB 시스템의 스크류 파트의 작동 메커니즘을 수식화 하고, Simulink의 SimMechanics library를 이용한 모델링을 통해 시뮬레이션을 수행하였으며, 기 제작된 EPB 시스템의 실험데이터와 비교분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 본 EPB 시스템의 시뮬레이션 모듈은 각 파트별로 모듈화 함으로써 메커니즘 요소의 추가와 개선에 따른 프로퍼티의 변경이 용이하게 되었다.
- (2) 본 EPB 시뮬레이션 모듈은 기 제작된 EPB 실험 데이터와 모사됨으로 향후 EPB 메커니즘 개발에 유용하게 활용될 것이다.

참고 문헌

- (1) Moon, B. J., Park, Y. J., Kim, D. S., and Park, C. K., 2008, "Model Base Fault Detection of Electronic Parking Brake System," *KSAE conference proceedings*, No. 4, pp. 1899~1903.
- (2) Yang, I. J., Son, Y. S., Park, I. U., Noh, K. S., and Yoon, P. J., 2006, "Development and Performance Evaluation of Electronic Parking Brake," *Proceeding of the KSAE Spring Conf.*, No. 2, pp. 953~958.
- (3) Lee, Y. O., 2007, "A Nonlinear Proportional Controller for Electric Parking Brake(EPB) System", *SAE2007-01-3657*.
- (4) Chung, H. B., 2007, "A Fault Detection Method for Electric Parking Brake(EPB) System with Sensorless Estimation Using Current Ripples", *SAE2007-01-3660*.